



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN E IMPACTO DE LAS HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN INGENIERÍA ELÉCTRICA. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE.”

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniera Eléctrica

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales

AUTORA:

Fernanda Abigail Guamán Pabón

DIRECTOR:

PhD. Collaguazo Galeano Gerardo Isaías

Ibarra – Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Guamán Pabón Fernanda Abigail

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis de la aplicación e impacto de las herramientas de inteligencia artificial en ingeniería eléctrica. Estudio del estado del arte.
AUTOR (ES):	Guamán Pabón Fernanda Abigail
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	15/05/2026
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> SGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Eléctrica
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Guerra Massón Julio Esteban Msc. Ing. Collaguazo Galeano Gerardo Isaías PhD

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 20 días del mes de mayo de 2026

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Guamán Pabón Fernanda Abigail

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Yo, Collaguazo Galeano Gerardo Isaías en calidad de director de la señorita estudiante Fernanda Abigail Guamán Pabón, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: “ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN E IMPACTO DE LAS HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN INGENIERÍA ELÉCTRICA. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE”.

Para la obtención del título de Ingeniera Eléctrica, aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....

Ing. Collaguazo Galeano Gerardo Isaías PhD.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD
DEDICATORIAS



Dedico el presente trabajo de grado y cada uno de los logros alcanzados a Dios, quien me ha brindado sabiduría, fortaleza, entendimiento y fe para no rendirme en cada paso de mi vida.

Asimismo, dedico este logro a mi familia, por su apoyo incondicional, confianza y acompañamiento durante mi formación profesional. Gracias a quienes estuvieron a mi lado y me tendieron una mano en los momentos más difíciles, motivándome siempre a seguir adelante y cumplir mis metas.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que me brindaron su apoyo durante el desarrollo de esta etapa académica y en la realización del presente trabajo de titulación.

De manera especial, agradezco profundamente a mis padres, Luis Guamán y Rosa Pabón, quienes han sido mi mayor inspiración y el pilar fundamental en mi formación personal y profesional. Gracias a su esfuerzo, valores y apoyo incondicional, hoy soy la persona que he llegado a ser.

Asimismo, expreso mi agradecimiento a mi director de tesis, PhD. Gerardo Collaguazo Galeano, y a mi asesor, Ing. Julio Guerra Massón MSc., por su guía, conocimientos y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.



INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I	13
INTRODUCCIÓN	13
1.1 Problema de investigación.	13
1.1.1 Problemática a investigar.	13
1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación	14
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo general	14
1.2.3 Objetivos específicos	14
1.3 Alcance y delimitación.....	14
1.4 Justificación	15
CAPÍTULO II.....	17
MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 Antecedentes.....	17
2.2 Fundamentos de la inteligencia artificial y su clasificación general	20
2.1.1 Inteligencia artificial, aprendizaje automático, aprendizaje profundo y sistemas inteligentes.	21
2.1.2 Principios teóricos y modelos base.....	22
2.1.3 Clasificación general de herramientas de inteligencia artificial	23
2.2 Evolución del uso de IA en la ingeniería eléctrica.	25
2.2.1 Antecedentes históricos y estado del arte internacional	27
2.2.2 Transición de métodos tradicionales a herramientas inteligentes	32
2.2.3 Tendencias en el uso de inteligencia artificial por tipo de herramienta.	34
2.2.4 Casos de aplicación en Latinoamérica y Ecuador.....	36
CAPÍTULO III	39
MATERIALES Y MÉTODOS	39
3.1 Enfoque y tipo de investigación:.....	39
3.2 Diseño de la investigación Materiales, equipos y software.....	39
3.2.1 Revisión bibliométrica	40
3.2.2 Revisión sistemática	40



	3.2.2.1
<i>Metodología PRISMA</i>	41
3.2.2.2 Criterio de búsqueda	41
3.2.2.3 Criterios de inclusión	41
3.2.2.4 Criterios de exclusión	42
3.2.2.5 Diagrama de flujo PRISMA	42
3.3 Softwares y Bases de datos	43
3.3.1 Bibliometrix	44
3.3.2 VOSviewer	44
3.4 Equipos y materiales	44
3.5 Métodos, técnicas e instrumentos.	45
3.5.1 Método Documental	46
3.5.2 Método descriptivo documental	46
3.5.3 Método descriptivo	47
3.5.4 Método Bibliométrico	47
3.5.5 Método sistemático	47
3.5.6 Método analítico e interpretativo	48
CAPITULO IV	49
RESULTADOS Y ANÁLISIS	49
4.1 Casos de uso de herramientas de inteligencia artificial en sistemas eléctricos: Análisis bibliométrico	49
4.1.1 Identificación bibliométrica de casos de uso más frecuente	49
<i>4.1.1.1 Producción científica anual</i>	49
<i>4.1.1.2 Citas promedio por año</i>	51
<i>4.1.1.3 Fuentes de mayor relevancia</i>	52
<i>4.1.1.4 Producción científica por países</i>	54
<i>4.1.1.5 Top 20 países con mayor número de artículos publicados</i>	56
<i>4.1.1.6 Relación por países, palabras clave y afiliaciones institucionales</i>	57
<i>4.1.1.7 Relación entre países, palabras clave y términos del resumen</i>	59
4.1.1.8 Países más citados	61
4.1.1.9 Trabajos globales más citados	63
4.1.2 Análisis de co-ocurrencia en VOSviewer	65



	4.1.2.1
Análisis de co-ocurrencia de palabras clave mediante VOSviewer (Web of Science)	65
4.1.2.2 Análisis de concurrencia de palabras clave mediante VOSviewer (Scopus).....	68
4.1.3 Revisión sistemática	70
4.1.4 Matriz de extracción de datos	72
4.1.5 Herramientas de inteligencia artificial identificadas	78
4.1.6 Áreas del sistema eléctrico donde se aplican las herramientas de inteligencia artificial.....	80
4.2 Impacto tecnológico, económico y operativo de la inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica.	82
4.2.1 Impacto tecnológico.....	82
4.2.2 Impacto económico.....	83
4.2.3 Impacto operativo	83
4.2.5 Síntesis del impacto	84
Conclusiones.....	86
Recomendaciones.....	87
Referencias bibliográficas.....	88



INDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Diagrama de flujo Prisma	43
Figura. 2 Flujograma metodológico para el análisis bibliométrico sobre herramientas IA en Ingeniería Eléctrica.....	46
Figura. 3 Producción científica anual en el periodo 2021- 2025, análisis bibliométrico	50
Figura. 4 Diagrama de barras de citas promedio por año (2021–2025).....	51
Fig. 5 Principales fuentes de publicación según número de artículos.....	53
Figura. 6 Mapa mundial de producción científica por países.....	55
Figura. 7 Producción científica de los 20 países con mayor número de artículos publicados.....	57
Figura. 8 Relación por países, keywords y afiliaciones institucionales	58
Figura. 9 Relación entre países, palabras clave y términos del resumen	60
Figura. 10 Países con mayor número de citas científicas a nivel mundial	62
Figura. 11 Análisis de concurrencia en VOSviewer con bases bibliográficas de Web of Science.....	66
Figura. 12 Análisis de concurrencia en VOSviewer con bases bibliográficas de Scopus	68
Figura. 13 Diagrama PRISMA del proceso de selección de artículos científicos.....	71



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Artículos científicos con mayor número de citas globales	63
Tabla 2 Matriz de Síntesis de evidencia Grupo 1	72
Tabla 3 Matriz de síntesis de evidencia Grupo 2	75
Tabla 4. Herramientas de inteligencia artificial identificadas y sus principales áreas de aplicación en la ingeniería eléctrica	79

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****RESUMEN**

Los múltiples desafíos que enfrentan los sistemas eléctricos modernos y la necesidad de mejorar la eficiencia operativa y automatización de procesos han impulsado el uso de herramientas de inteligencia artificial dentro de la ingeniería eléctrica. Sin embargo, existe una dispersión significativa de información sobre las herramientas o técnicas más utilizadas, sus aplicaciones y el impacto que genera en este campo. En este contexto, el presente trabajo de grado tiene como propósito analizar el estado del arte sobre la aplicación y contribución de las herramientas de inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica. La metodología empleada corresponde a un análisis bibliométrico y documental basado en la recopilación, clasificación y evaluación de artículos científicos indexados en las bases de datos académicas de Scopus y Web of Science. Para el procesamiento y visualización de la información se utilizaron herramientas de análisis científico que permitieron identificar tendencias de investigación, autores relevantes, herramientas más utilizadas y áreas de aplicación dentro del área eléctrica. Los resultados evidencian que técnicas como redes neuronales, aprendizaje automático, lógica difusa y algoritmos evolutivos han sido ampliamente utilizados en aplicaciones relacionadas con detección de fallas, predicción de demanda energética, control de sistemas eléctricos, mantenimientos predictivos e integración de energías renovables, consolidándose como herramientas clave para la modernización de los sistemas eléctricos, contribuyendo a mejorar la eficiencia operativa, la automatización de procesos y la toma de decisiones en el sector energético.

Palabras clave: Inteligencia artificial en sistemas eléctricos, análisis bibliométrico, revisión sistemática PRISMA, redes neuronales profundas, detección de fallas en sistemas eléctricos.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****ABSTRACT**

The increasing complexity of modern electrical systems and the need to improve operational efficiency and process automation have promoted the use of artificial intelligence tools within the field of electrical engineering. However, there is a significant dispersion of information regarding the most commonly used tools or techniques, their applications, and the impact they generate in this field. In this context, the purpose of this research is to analyze the state of the art regarding the application and contribution of artificial intelligence tools in electrical engineering. The methodology employed corresponds to a bibliometric and documentary analysis based on the collection, classification, and evaluation of scientific articles indexed in academic databases such as Scopus and Web of Science. For the processing and visualization of information, scientific analysis tools were used to identify research trends, relevant authors, the most widely used tools, and application areas within the electrical engineering field. The results show that techniques such as neural networks, machine learning, fuzzy logic, and evolutionary algorithms have been widely used in applications related to fault detection, energy demand forecasting, electrical system control, predictive maintenance, and the integration of renewable energy sources. These techniques have become key tools for the modernization of electrical systems, contributing to improved operational efficiency, process automation, and decision-making within the energy sector.

Keywords: Artificial intelligence in electrical systems, bibliometric analysis, PRISMA systematic review, deep neural networks, fault detection in electrical systems.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema

Análisis de la aplicación e impacto de las herramientas de inteligencia artificial en ingeniería eléctrica. Estudio del estado del arte.

El problema

1.1 Problema de investigación.

En el contexto actual, el sector eléctrico se encuentra en constante evolución debido a la incorporación de tecnologías avanzadas que buscan mejorar la eficiencia, confiabilidad y desempeño de los sistemas eléctricos. Entre estas tecnologías, la inteligencia artificial ha emergido como una herramienta clave para abordar problemas complejos dentro del sector.

No obstante, el creciente volumen de investigaciones en este campo ha generado la necesidad de organizar, analizar y comprender de manera estructurada el uso y alcance de estas herramientas en la ingeniería eléctrica.

1.1.1 Problemática a investigar.

La ingeniería eléctrica en la actualidad enfrenta múltiples desafíos que se derivan de la creciente complejidad de los sistemas eléctricos como el incremento de demanda, la necesidad de eficiencia energética, la modernización de infraestructuras, etc.

Las herramientas de inteligencia artificial se han posicionado como una tecnología prometedora para atender estos retos, permitiendo reducir procesos como el diseño de sistemas eléctricos, la predicción de demanda, el mantenimiento preventivo, el modelado de flujos de carga y la detección de fallas en tiempo real, entre otras. Sin embargo, persiste una falta de sistematización integral sobre cuales de estas herramientas están siendo utilizadas, que beneficios concretos ofrecen y cuáles son sus limitaciones actuales.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Esta situación plantea la necesidad de realizar un estudio del arte que permita identificar, clasificar y analizar las contribuciones reales de la inteligencia artificial dentro del campo de la ingeniería eléctrica.

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿Cuáles son las herramientas de inteligencia artificial empleadas en la ingeniería eléctrica, considerando su uso, aplicación e impacto en la eficiencia operativa, la automatización de procesos y la transformación tecnológica según el estado del arte actual?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Analizar el estado del arte sobre el uso y la contribución de las herramientas de inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica, mediante un análisis bibliométrico para la identificación del impacto y tendencias emergentes.

1.2.3 Objetivos específicos

- Clasificar las herramientas de inteligencia artificial más utilizadas en la ingeniería eléctrica según su tipo.
- Describir los casos de uso donde la inteligencia artificial ha contribuido a la mejora de sistemas eléctricos.
- Identificar el impacto tecnológico, económico y operativo de la inteligencia artificial en el campo de la ingeniería eléctrica.

1.3 Alcance y delimitación

La presente investigación tiene como objetivo un análisis documental científico-técnico de tipo bibliométrico del estado del arte sobre el uso y contribución de las herramientas IA en la ingeniería eléctrica, con un alcance descriptivo y analítico, centrado en la recopilación, organización y análisis de información científica y técnica relacionada con el uso de herramientas de inteligencia artificial (IA) en el campo de la ingeniería eléctrica. El estudio se realizará con fuentes científicas y técnicas como Scopus y Web of Science



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



(WoS), priorizando artículos de revistas indexadas, conferencias internacionales, libros académicos y reportes técnicos.

Se abordarán, tanto los tipos de herramientas IA utilizadas desde el punto de vista del aprendizaje automático, redes neuronales, algoritmos genéticos, lógica difusa, redes recurrentes (RNN) y su aplicación funcional, como también se analizarán las distintas áreas de aplicación de la IA en ingeniería eléctrica, como redes inteligentes, sistemas de control automático, mantenimiento predictivo y eficiencia energética.

La metodología de búsqueda serán combinaciones de palabras clave y operadores booleanos, para clasificar la producción científica, autores más relevantes, contenido y herramientas IA más utilizadas, áreas de aplicación dentro de la ingeniería eléctrica, artículos más citados y tendencias emergentes.

Asimismo, se identificarán los impactos observados en aspectos tecnológicos, operativos y económicos, además de los desafíos técnicos, éticos y de implementación documentados en la literatura técnica y científica.

Los resultados serán presentados de forma cuantitativa y descriptiva, con el apoyo de herramientas de análisis y visualización científica como Bibliometrix juntamente con la librería biblioshiny que ayudará a la visualización de resultados y VOSviewer que facilita la interpretación de datos y relaciones clave en el desarrollo de esta temática.

1.4 Justificación

La investigación actual es importante porque permite comprender de forma estructurada el papel que desempeñan las herramientas de inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica, un campo técnico que está siendo transformado por tecnologías inteligentes capaces de enfrentar desafíos complejos como la eficiencia operativa, la automatización de procesos, el mantenimiento predictivo y la gestión de sistemas eléctricos modernos.

El proyecto aporta información nueva al generar un estudio del arte que sistematiza y analiza investigaciones recientes, identificando cómo se están utilizando las diferentes



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



técnicas de IA, cuáles han sido sus resultados más relevantes y qué enfoques están predominando en el área eléctrica. Esto permite establecer un panorama claro sobre los avances y brechas que aún existen en el uso de estas herramientas, lo cual no ha sido abordado de forma integral en la literatura disponible.

El estudio resuelve la necesidad de organización, análisis y síntesis crítica de múltiples aplicaciones de IA en la ingeniería eléctrica, permitiendo así orientar futuras investigaciones o desarrollos tecnológicos con base en la evidencia existente. Al ofrecer un análisis detallado de los beneficios y limitaciones observadas en casos reales, se genera conocimiento aplicable para la academia, la industria eléctrica y los desarrolladores de soluciones basadas en IA.

Se investiga esta temática porque la transformación digital del sector eléctrico es inminente y requiere una comprensión profunda sobre las tecnologías que lo impulsan. La inteligencia artificial, por su capacidad adaptativa y predictiva, se perfila como un recurso fundamental para mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema eléctrico, por lo que resulta pertinente estudiar su aplicación desde una perspectiva científica actualizada.

Entre los beneficiarios se encuentran investigadores, estudiantes de ingeniería, desarrolladores de soluciones con herramientas de inteligencia artificial y profesionales del sector eléctrico que requieren una base referencial sólida para tomar decisiones informadas sobre la incorporación de estas herramientas.

De esta manera, el estudio resulta viable, ya que se basa en una revisión bibliométrica documental que aprovecha fuentes científicas actualizadas y accesibles, sin necesidad de recursos materiales o experimentales complejos, permitiendo un abordaje riguroso del tema propuesto.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En este apartado se presentan recientes investigaciones que reflejan el estado del arte actual del uso de la inteligencia artificial (IA) dentro de la ingeniería eléctrica. Estas tecnologías inteligentes han permitido la evolución de sistemas tradicionalmente rígidos hacia la obtención de soluciones más inteligentes y adaptables. Los estudios revisados reflejan la importancia y utilidad de estas herramientas tecnológicas aplicadas a las diferentes áreas del campo eléctrico que enfrenta desafíos complejos como la gestión de sistemas eléctricos, el mantenimiento predictivo, la eficiencia energética y la automatización de procesos industriales [1].

El impacto que tiene la inteligencia artificial en tecnologías sustentables en el campo energético. La investigación combinó revisión sistemática de literatura, minería de datos y análisis cuantitativo utilizando modelos de regresión. Uno de los aportes principales fue la evaluación de algoritmos de aprendizaje automático para la reducción del consumo energético y la gestión de residuos. Los resultados obtenidos reflejaron mejoras del 30% en consumo energético, 25% en reducción de desperdicio de recursos y una eficiencia operativa incrementada en un 20%, todos estos factores son clave en redes eléctricas modernas. Los hallazgos respaldan la aplicabilidad de la inteligencia artificial (IA) en el diseño de sistemas eléctricos más eficientes, especialmente en áreas donde se busca mejorar el rendimiento operativo desde la etapa de planificación [2].

Se realizó un estudio sobre el uso y la contribución de la IA en la ingeniería eléctrica clasificando enfoques según las herramientas de IA usadas y las áreas de aplicación. En dicho estudio se identificó el uso de redes neuronales en tareas como la detección de fallas, clasificación y modelado de sistemas eléctricos, así como el empleo de algoritmos metaheurísticos para la optimización de procesos y técnicas basadas en lógica difusa para el control y toma de decisiones. Los resultados evidencian mejoras significativas en la eficiencia, confiabilidad y operación de las redes eléctricas [3].

Una metodología práctica e innovadora para el diseño de redes de distribución eléctrica mediante el uso de drones juntamente con algoritmos de inteligencia artificial (IA). El enfoque consistió en la generación de orto mapas a través de vuelos planificados y el procesamiento de imágenes con



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



algoritmos de visión computacional entrenados en Teachable Machine [4]. El sistema se aplicó a tres proyectos reales de la empresa Centro sur C.A., en los que se logró automatizar el reconocimiento de estructuras de media tensión (MT) y la elaboración del desglose de materiales. A pesar de que el algoritmo alcanzó una tasa de acierto de un 55%, la implementación general permitió reducir en un 33% el tiempo necesario para la etapa de diseño [5]. Este antecedente demuestra el potencial de la inteligencia artificial para la reducción de procesos técnicos en diseño de redes eléctricas, especialmente en áreas de difícil acceso o una topografía variable. Se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la IA en redes eléctricas inteligentes, evaluando su aplicación en funciones como la previsión de demanda, la reducción de flujo energético y la detección temprana de fallas.

El análisis identificó el uso de redes neuronales recurrentes (RNN) y modelos LSTM como herramientas efectivas para predecir el comportamiento dinámico de la demanda y así ajustar en tiempo real la distribución de energía [6]. El estudio abarca una visión amplia del sistema eléctrico, sus aportes teóricos y prácticos son indispensables para evidenciar que la IA se ha convertido en una herramienta clave para enfrentar los retos complejos de la ingeniería eléctrica, mejorando la eficiencia y confiabilidad de los sistemas eléctricos [7]. Un estudio comparativo entre redes neuronales artificiales (ANN) y sistemas adaptativos de inferencia neuro- difusa (ANFIS) aplicado a redes eléctricas reales de Marruecos. El objetivo fue predecir en tiempo real los valores de magnitudes de tensión y ángulos de fase. Para ello, se entrenaron modelos de ANN y ANFIS con datos reales de 2 buses (14 y 24 buses) empleando métricas como el error cuadrático medio (MSE) y el error cuadrático medio raíz (RMSE) para evaluar el rendimiento. Los resultados obtenidos demostraron que ANFIS superó ANN tanto en tiempo de entrenamiento como en precisión de los resultados, lo que evidencia el potencial de los enfoques híbridos para el modelado de flujos de carga en sistemas eléctricos [8]. En la investigación de [9], desarrolló un sistema embebido basado en inteligencia artificial para la detección, localización y alerta de fallas de alta impedancia (HIF) en líneas de distribución eléctrica de media tensión. Utilizando modelos de redes neuronales (MLP, CNN) y máquinas de soporte vectorial (SVM), entrenados con datos simulados en MATLAB/Simulink a un muestreo de 500 muestras por ciclo, se logró capturar características detalladas para un aprendizaje eficaz. El conjunto de datos se dividió en 80% para entrenamiento y 20% para validación. Las pruebas con datos no vistos durante el entrenamiento y reales de eventos de fallas mediante oscilografías obtenidas de relés de protección mostraron



precisiones del 65% al 95%. En el sistema embebido, el tiempo de procesamiento promedio fue de 16.9 ms, destacando la viabilidad de la IA para la detección de fallas eléctricas en entornos críticos donde la precisión es esencial.

A demás en el estudio de [10], se utilizó un modelo para simular fallas de alta impedancia (HIF) en una red de distribución de 33kV, configurando el modelo para diferentes escenarios de los cuales se generó datos con fallas y el otro sin fallas considerando fallas en una o varias fases y seccionando la línea en 5 partes para el análisis en diferentes ubicaciones, las formas de onda fueron divididas para una proporción de 80:20 para entrenamiento, validación y prueba mediante una red neuronal convolucional conectada. Los resultados fueron de 99.44 % de detección en precisión y 99.78% en localización demostrando mejoras en la seguridad de redes eléctricas [11]. El análisis de consumo energético por sectores y la comparativa de patrones de uso entre los países de Sudáfrica y Nigeria para identificar áreas que podrían ser mejoradas con IA en la gestión energética, la metodología utilizada redes neuronales artificiales, máquinas de soporte vectorial y sistemas neuro-difusos, los resultados evidencian que la IA aumenta y fortalece la sostenibilidad del sistema eléctrico en distintos sectores. [12]. En el estudio de [13], presenta un sistema inteligente para el diagnóstico de fallas en transformadores eléctricos mediante el análisis de gases disueltos (DGA) y aplicando métodos de redes neuronales, lógica difusa y algoritmos de optimización. Se utilizaron 368 muestras DGA reales, el modelo propuesto TFDIS combino los resultados de cuatro diagnósticos para la toma de decisiones más precisa mediante una lógica de votación precisa, los resultados obtenidos fueron del 89.12% de precisión de este modelo superando los métodos tradicionales como el IEC 60599 y 4 razones de Rogers. Este estudio presenta una contribución relevante para el estado del arte.

En cuanto a la transformación de control en la automatización eléctrica, con mejoras en eficiencia, fiabilidad y reducción económica, mediante un análisis general permite evidenciar que la IA permite simplificar procesos complejos, realizar diagnóstico de fallas con mayor precisión, este estudio utiliza 3 técnicas para el control eléctrico automatizado, control difuso, control experto y control con redes neuronales permitiendo tener un control adaptativo, muestra de forma cualitativa que la IA reduce costos, errores y carga laboral, mejorando la fiabilidad en sistemas eléctricos automatizados [14].



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



2.2

Fundamentos de la inteligencia artificial y su clasificación general

Los principios de la inteligencia artificial anteceden a la aparición del computador. La concepción clásica de esta disciplina sostiene que el conocimiento puede representarse mediante estructuras formales, una idea que se remonta a la aritmética pitagórica y la lógica de Aristóteles. Aunque el término “inteligencia artificial” fue empleado formalmente por primera vez durante la conferencia de Dartmouth en 1956, su trasfondo intelectual es milenario. Desde entonces, la IA ha sido parte de un proyecto que busca reducir el pensamiento a cálculo y concebir lenguajes universales para la razón [15].

Los fundamentos de la inteligencia artificial se basan en teorías provenientes de diversas áreas del conocimiento, tales como la matemática, la estadística, la neurociencia, la lógica simbólica y la informática. Históricamente, la IA ha estado profundamente influenciada por la neurociencia, disciplina que estudia la estructura y el funcionamiento del cerebro humano.

A lo largo del tiempo, múltiples descubrimientos neurobiológicos han servido de base para el desarrollo de modelos computacionales que intentan simular el comportamiento inteligente. Entre los ejemplos más representativos se encuentran las redes neuronales artificiales, inspiradas en las conexiones sinápticas del sistema nervioso; los mecanismos de atención implementados en redes neuronales profundas, derivados de estudios de neuroimagen funcional; y los módulos de memoria a corto y largo plazo, basados en las capacidades de almacenamiento y procesamiento del cerebro humano [16].

En la actualidad, la inteligencia artificial se ha consolidado como una de las disciplinas más dinámicas dentro del ámbito de las ciencias computacionales, con el objetivo principal de desarrollar sistemas capaces de imitar o reproducir procesos cognitivos propios del ser humano. Esta área abarca el estudio de algoritmos, modelos computacionales y arquitecturas que permiten a las máquinas realizar tareas como el aprendizaje, el razonamiento, la planificación y la percepción. Para lograr una comprensión integral de esta disciplina, es fundamental examinar sus definiciones clave, sus principios teóricos y su clasificación general [17].



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



2.1.1 Inteligencia artificial, aprendizaje automático, aprendizaje profundo y sistemas inteligentes.

La inteligencia artificial puede definirse como la capacidad de un sistema informático para llevar a cabo tareas que, si fueran realizadas por humanos, requerirían inteligencia.

Estas tareas incluyen el reconocimiento de patrones, el procesamiento de lenguaje natural, la toma de decisiones y la generación de contenidos originales. [15], [16]

Uno de sus subcampos más relevantes es el aprendizaje automático, el cual permite que un sistema aprenda directamente de los datos, sin necesidad de ser programado explícitamente. A través de este enfoque, los algoritmos identifican patrones y regularidades que luego se generalizan para tomar decisiones o realizar predicciones. El aprendizaje profundo constituye una extensión avanzada del aprendizaje automático, caracterizado por el uso de redes neuronales artificiales profundas.[18], [19], [20]

Estas estructuras están formadas por múltiples capas de procesamiento que permiten interpretar datos complejos de manera jerárquica. En el campo del procesamiento de imágenes, por ejemplo, las capas iniciales detectan bordes y formas simples, mientras que las capas más profundas reconocen objetos complejos.[17][21]. Además, existen los sistemas inteligentes, se entiende como un conjunto de componentes tecnológicos interconectados que poseen la capacidad de captar información del entorno, procesarla con base en conocimientos previos o adquiridos, y actuar de manera autónoma con el fin de cumplir ciertos objetivos.

Estos sistemas combinan diversas funciones como la percepción mediante sensores, el análisis y la toma de decisiones mediante mecanismos de razonamiento, la capacidad de aprendizaje adaptativo, la comunicación con otros sistemas o usuarios, y la ejecución de acciones a través de actuadores.[19], [20]

A diferencia de los sistemas automáticos convencionales, que siguen instrucciones predefinidas, los sistemas inteligentes tienen la habilidad de adaptarse a condiciones cambiantes del entorno y tomar decisiones sin intervención humana directa. Esta



adaptabilidad y autonomía les permite operar de manera flexible, responder a situaciones nuevas y optimizar su comportamiento en función del contexto en el que se encuentran.[19]

2.1.2 Principios teóricos y modelos base.

El desarrollo de la inteligencia artificial ha estado fuertemente influenciado por los avances en neurociencia, particularmente en la comprensión del cerebro humano. Inspiradas en la estructura y dinámica de las redes neuronales biológicas, las RNA están diseñadas para ajustar sus conexiones internas los pesos sinápticos a partir de la experiencia, lo que les permite resolver tareas complejas de clasificación, reconocimiento o predicción.[22]

En los últimos años, ha cobrado relevancia el uso del modelado de grafos como una herramienta para analizar estas redes desde una perspectiva más estructural y funcional. Este enfoque, ampliamente utilizado en neurociencia para estudiar la conectividad cerebral, se adapta al análisis de RNA con el objetivo de comprender mejor su organización interna y su evolución durante el aprendizaje. A través de representaciones gráficas, donde las unidades neuronales se modelan como nodos y sus interconexiones como aristas, es posible detectar configuraciones clave que influyen en el desempeño, identificar posibles debilidades estructurales e incluso anticipar fenómenos como una pérdida de información previamente aprendida al adquirir nuevos conocimientos.[22]

La implementación de este marco permite evaluar cómo varía la conectividad de la red a medida que se enfrenta a nuevas tareas, lo cual resulta útil para diseñar sistemas más estables y adaptativos. Además, ofrece un puente entre los estudios de neurociencia y el desarrollo de modelos de IA, integrando conceptos como plasticidad y estabilidad en el análisis del aprendizaje automático.

Entre las herramientas actuales de inteligencia artificial, la Búsqueda de Arquitectura Neuronal (NAS) surge como una evolución de los métodos tradicionales de diseño manual de redes neuronales, automatizando y optimizando la creación de arquitecturas eficientes. En este contexto, MOPSO/D-Net representa un avance moderno que emplea



optimización multiobjetivo por enjambre de partículas para generar redes convolucionales optimizadas. Esta herramienta de IA mejora la precisión y reduce la complejidad de los modelos, facilitando el desarrollo de sistemas inteligentes más eficientes y con menor demanda computacional.[23]

Uno de los modelos fundamentales que ha marcado un gran avance en el campo reciente de la inteligencia artificial es el Transformer, presentado por [24]. A diferencia de las arquitecturas clásicas que emplean redes recurrentes o convolucionales, este modelo introduce un mecanismo llamado autoatención, que posibilita analizar las relaciones contextuales entre todos los elementos de una secuencia de forma simultánea y paralela. Esta innovación permite capturar dependencias a largo plazo con mayor eficacia y disminuye los recursos computacionales necesarios, lo que resulta especialmente útil en aplicaciones como la traducción automática y el procesamiento de lenguaje natural.

La estructura del Transformer se basa en bloques tanto de codificación como de decodificación, que incorporan capas de atención multi-cabeza junto con redes neuronales densas. Gracias a esta arquitectura, han surgido modelos más avanzados como los Generative Pre-trained Transformers (GPT), que hoy día se emplean ampliamente en sistemas inteligentes. El diseño del Transformer ha superado el rendimiento de modelos anteriores en diversas tareas, estableciendo un nuevo estándar en sistemas de inteligencia artificial orientados al procesamiento secuencial.

2.1.3 Clasificación general de herramientas de inteligencia artificial

Estas herramientas de inteligencia artificial pueden clasificarse por su capacidad cognitiva la cual se basa en el grado de autonomía, adaptabilidad e inteligencia presente en el sistema. Por otro lado, su clasificación desde un enfoque metodológico hace referencia a como se construyen y entrenan los modelos IA.

Desde un enfoque metodológico se clasifican de la siguiente manera:

- **Redes neuronales artificiales (ANN):** Inspiradas en la estructura de las neuronas biológicas, estas redes procesan información mediante capas de nodos



interconectados. El modelo de perceptrón, propuesto en los inicios de la IA, permitió modelar funciones básicas de procesamiento similar al cerebro.

- **Redes neuronales convolucionales (CNN):** Surgen a partir del estudio del sistema visual de los mamíferos, en el que se observó un procesamiento jerárquico y convolucional de la información visual. Este modelo es fundamental para el reconocimiento de imágenes y otras aplicaciones visuales.
- **Modelos con mecanismos de atención:** Basados en investigaciones del cerebro humano, estos modelos permiten focalizar los recursos de cómputo en información relevante, mejorando tareas de procesamiento secuencial y visión por computadora.
- **Modelos con memoria (LSTM):** Desarrollados a partir del concepto de memoria de trabajo en el cerebro, estos modelos son capaces de retener información temporal y son ampliamente utilizados en tareas como procesamiento de lenguaje natural y análisis de series temporales.
- **Aprendizaje continuo y consolidación elástica de pesos (EWC):** Inspirado en los mecanismos de plasticidad sináptica observados en la neurociencia, este enfoque busca evitar el olvido catastrófico al permitir que los modelos aprendan nuevas tareas sin perder el conocimiento anterior.
- **Aprendizaje por refuerzo (RL):** Basado en la conducta adaptativa observada en organismos biológicos, este enfoque permite a los agentes de IA aprender mediante la interacción con su entorno y la recepción de recompensas, simulando procesos de condicionamiento

De acuerdo con su nivel de capacidad cognitiva se clasifican como IA débil o estrecha, fuerte y general. Desde el punto de vista de su capacidad funcional, se distinguen tres tipos:

- **IA débil o estrecha (Narrow AI),** hace referencia a aquellos sistemas que están diseñados para llevar a cabo tareas específicas dentro de contextos delimitado[25] Este tipo de inteligencia artificial no posee conciencia ni comprensión real de sus acciones; simplemente ejecuta funciones predefinidas con base en datos y reglas programadas. Según [26], este tipo de sistemas requiere ajustes humanos cada vez



que se presentan cambios en el entorno o en los objetivos, ya que carecen de la capacidad de adaptación autónoma. Ejemplos representativos incluyen asistentes virtuales, sistemas de diagnóstico médico, motores de recomendación y vehículos autónomos actuales, los cuales son altamente competentes dentro de sus respectivos dominios, pero ineficaces fuera de ellos [26]

- La **inteligencia artificial fuerte** fue propuesta en la literatura temprana de la IA para describir sistemas que no solo simularan comportamientos inteligentes, sino que también poseyeran facultades como la conciencia, la intencionalidad y la comprensión del entorno, al nivel de un ser humano. Sin embargo, el término ha generado confusión conceptual, especialmente debido a su uso en debates filosóficos sobre la mente y la conciencia artificial. Como señala Goertzel, esta ambigüedad ha llevado a una menor adopción del término en la comunidad científica, siendo reemplazado en gran medida por el concepto más técnico y operativo de inteligencia artificial general.[26]
- La **inteligencia artificial general (AGI)** representa un nivel cognitivo más avanzado, en el que los sistemas poseen la capacidad de aprender, adaptarse y generalizar conocimientos a través de múltiples dominios, contextos y objetivos. AGI está orientada a replicar la flexibilidad cognitiva de los seres humanos, permitiendo la resolución de problemas no anticipados por sus creadores, mediante mecanismos como el aprendizaje transferido, la planificación flexible y el razonamiento abstracto. [26], describe este tipo de inteligencia como cualitativamente distinta a la IA específica, y destaca que su desarrollo requiere arquitecturas computacionales novedosas capaces de integrar memoria, percepción, motivación, lenguaje y otras funciones cognitivas en sistemas coherentes y adaptativos.

2.2 Evolución del uso de IA en la ingeniería eléctrica.

Durante las décadas de 1950 y 1960, los aportes de figuras pioneras como Herbert Simon, Allen Newell y John McCarthy sentaron las bases de los sistemas inteligentes mediante



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



el desarrollo de lenguajes de programación simbólica y algoritmos de inferencia lógica. Esta etapa fundacional coincidió con el surgimiento de la computación moderna, donde los ingenieros eléctricos colaboraron en el diseño de los primeros modelos computacionales orientados al razonamiento automatizado.[27]

Durante los años 1970 y 1980, se consolidaron los sistemas expertos, caracterizados por su capacidad para resolver problemas complejos mediante reglas y bases de conocimiento. Estas herramientas se aplicaron ampliamente en áreas como el diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos, el diseño de circuitos y la automatización del control, permitiendo una toma de decisiones más eficiente dentro del entorno eléctrico.

En las décadas de 1980 y 1990 resurgió el interés por las redes neuronales artificiales, impulsado por avances teóricos como el algoritmo de retro propagación y el crecimiento del poder computacional. Los ingenieros eléctricos aprovecharon estos modelos para implementar soluciones de reconocimiento de patrones, procesamiento de señales y control adaptativo, ampliando significativamente el espectro de aplicaciones de la IA en este campo.

En el siglo XXI, la evolución de las técnicas de aprendizaje automático, junto con el acceso a grandes volúmenes de datos y el uso de arquitecturas más complejas, ha permitido optimizar redes de distribución eléctrica, implementar mantenimiento predictivo, gestionar redes inteligentes y mejorar la integración de energías renovables. Especialmente, el aprendizaje por refuerzo ha facilitado el desarrollo de sistemas autónomos capaces de aprender de su entorno en tiempo real.

En la actualidad, la inteligencia artificial se integra estrechamente con tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y los sistemas ciberfísicos (CPS), promoviendo una nueva generación de sistemas eléctricos inteligentes [28]. Esta convergencia ha permitido mejoras sustanciales en áreas como ciudades inteligentes, movilidad eléctrica, automatización industrial y seguridad energética. El panorama futuro contempla avances disruptivos impulsados por la computación cuántica, la IA explicable y la computación



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



neuro mórfica, que prometen transformar aún más el perfil tecnológico de la ingeniería eléctrica [27].

2.2.1 Antecedentes históricos y estado del arte internacional

Se destacan antecedentes como los mitos griegos de autómatas, los trabajos mecánicos de Al-Jazari en el siglo XIII y la máquina analítica de Charles Babbage en el siglo XIX, considerada precursora de los ordenadores modernos. La importancia de Alan Turing como figura fundacional, con su propuesta de la “máquina universal” en 1936 y la formulación del “Test de Turing” en 1950, lo que sentó las bases teóricas para la IA moderna.[29]

La formalización del campo se consolidó en 1956 durante la conferencia de Dartmouth, donde John McCarthy, Marvin Minsky y otros científicos propusieron por primera vez el término "Inteligencia Artificial". Desde entonces, se han sucedido hitos clave como la creación del lenguaje LISP (1958), el desarrollo de robots como “Shakey” (1966), y los sistemas expertos como MYCIN (década de 1970), que evidenciaron la capacidad de la IA para imitar decisiones humanas en campos específicos. También resalta el "renacimiento" de las redes neuronales en la década de 1980 con el paradigma conexionista, impulsado por nuevas capacidades computacionales y avances en neurociencia.[29], [30].

El uso de las diferentes herramientas de inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica ha transitado desde enfoques experimentales hacia aplicaciones en sistemas complejos y consolidados. Inicialmente fueron empleadas para el control y modelado de variables eléctricas mediante redes neuronales artificiales y lógica difusa, estas técnicas demuestran capacidades avanzadas para gestionar entornos no lineales, responder en tiempo real y adaptación a situaciones incierta.[8], [31].

Uno de los enfoques pioneros fue la lógica difusa tipo-1, diseñada para modelar sistemas con incertidumbre. Sin embargo, con el paso del tiempo, se identificaron limitaciones para trabajar en entornos altamente dinámicos y ruidosos. Esto motivó el desarrollo de la



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



lógica difusa tipo-2, que amplía la capacidad de modelado y manejo de imprecisiones, permitiendo un control más robusto de sistemas no lineales juntamente con otros modelos basados en este método.[32]

Una revisión sistemática de estas aplicaciones, desarrolladas entre los años 1990 y 2019, evidencia su aplicación en tareas como el diagnóstico de fallos, la regulación de potencia, el control de motores y el reconocimiento de señales en redes eléctricas, consolidando su relevancia como una herramienta adaptable y precisa para la ingeniería eléctrica moderna.

Paralelamente, comenzaron a utilizarse redes neuronales artificiales en la modelación y predicción de variables eléctricas. Estas técnicas permitieron simular el comportamiento de sistemas eléctricos complejos sin necesidad de modelos físicos exactos, abriendo paso a esquemas de aprendizaje automático. En este contexto, surgió el interés por comparar modelos convencionales con nuevas alternativas híbridas.[31]

Un estudio relevante aplicó y comparó redes neuronales artificiales (ANN) y sistemas adaptativos de inferencia neurodifusa (ANFIS) en redes eléctricas reales, evaluando su rendimiento en la predicción de magnitudes de tensión y ángulos de fase. El entrenamiento con datos reales demostró que ANFIS no solo ofrecía mayor precisión, sino que además requería menos tiempo de entrenamiento que ANN, evidenciando el potencial de los enfoques híbridos como predecesores de los sistemas inteligentes modernos en ingeniería eléctrica.[31][32]

Estas experiencias sentaron las bases metodológicas que, con el avance de la computación y la digitalización, permitirían el desarrollo de sistemas más complejos, como redes neuronales recurrentes, modelos híbridos, plataformas embebidas y aplicaciones de IA en tiempo real, que hoy constituyen el núcleo del estado del arte en el área.

Actualmente las herramientas de inteligencia artificial han sido adoptadas ampliamente en la ingeniería eléctrica a nivel internacional mostrando aplicaciones específicas en diferentes países y regiones.



En el contexto global, el diagnóstico de transformadores ha sido mejorado mediante el uso de modelos híbridos que combinan redes neuronales, lógica difusa y algoritmos de optimización. Un sistema conocido como TFDIS, aplicado a 368 muestras reales de análisis de gases disueltos (DGA), superó los métodos convencionales como IEC 60599 y la técnica de las cuatro razones de Rogers, alcanzando un 89,12 % de precisión en diagnóstico, lo que representa un avance significativo en confiabilidad para infraestructuras críticas. [33]

Un estudio comparativo entre redes neuronales artificiales (ANN) y sistemas adaptativos de inferencia neuro- difusa (ANFIS) aplicado a redes eléctricas reales de Marruecos. El objetivo fue predecir en tiempo real los valores de magnitudes de tensión y ángulos de fase. Para ello, se entrenaron modelos de ANN y ANFIS con datos reales de 2 buses (14 y 24 buses) empleando métricas como el error cuadrático medio (MSE) y el error cuadrático medio raíz (RMSE) para evaluar el rendimiento. Los resultados obtenidos demostraron que ANFIS superó ANN tanto en tiempo de entrenamiento como en precisión de los resultados, lo que evidencia el potencial de los enfoques híbridos para el modelado de flujos de carga en sistemas eléctricos.[8][34]

En Nigeria se utilizó un modelo para simular fallas de alta impedancia (HIF) en una red de distribución de 33kV, configurando el modelo para diferentes escenarios de los cuales se generó datos con fallas y el otro sin fallas considerando fallas en una o varias fases y seccionando la línea en 5 partes para el análisis en diferentes ubicaciones, las formas de onda fueron divididas para una proporción de 80:20 para entrenamiento, validación y prueba mediante una red neuronal convolucional conectada. Los resultados fueron de 99.44 % de detección en precisión y 99.78% en localización demostrando mejoras en la seguridad de redes eléctricas. [10]

En el Sudeste Asiático y Medio Oriente, diversas investigaciones han demostrado la efectividad del uso de control automático en la ingeniería eléctrica basado en algoritmos de inteligencia artificial presentado en el diseño de un sistema de control automatizado consistió en el desarrollo de un controlador inteligente que utiliza una red neuronal de



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



una sola neurona juntamente con un algoritmo híbrido compuesto por colonia de hormigas y algoritmos genéticos. Esta metodología demostró el mejoramiento de parámetros del controlador PD (H_p , H_i , H_d) bajo condiciones como la interferencia de carga del 20% y una perturbación de frecuencia de 2.1Hz. [35]

Los resultados obtenidos reflejaron una alta capacidad de adaptación y respuesta rápida, logrando alcanzar una tasa máxima de fallos del 2%, superando en rendimiento a métodos tradicionales. Este sistema permitió mejorar la eficiencia en la regulación de turbinas, reducir costos operativos y aumentar el nivel de automatización en sistemas eléctricos más complejos [35]

Una revisión exhaustiva en la India sobre sistemas eléctricos integrados demostró que técnicas de aprendizaje automático supervisado, no supervisado y reforzado han sido aplicadas en redes inteligentes, energías renovables, mantenimiento predictivo y ciberseguridad. La investigación abarcó más de 200 publicaciones actuales, centrándose en el uso de machine learning (ML) para resolver problemas emergentes en redes inteligentes, sistemas de energía renovable, mantenimiento predictivo, ciberseguridad y eficiencia energética.

La metodología utilizada fue el análisis de las técnicas de ML como aprendizaje supervisado y no supervisado y reforzado en la implementación en tareas como la predicción de generación eléctrica, detección de fallas, diagnóstico de anomalías y demanda. Se identificó el uso extensivo de redes neuronales profundas, máquinas de soporte vectorial (SVM), LSTM y redes convolucionales, como herramientas clave para mejorar la operación en tiempo real de sistemas eléctricos modernos.[36]

En cuanto a la detección avanzada de anomalías, en China se desarrolló un modelo híbrido basado en redes neuronales convolucionales (CNN) y memoria a largo y corto plazo (LSTM), que logró una precisión del 94,9% y redujo eventos anómalos en redes eléctricas de transmisión, demostrando el potencial de la IA para sostener la operación segura y continua del sistema eléctrico. [37]



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



En Argelia, se propuso una plataforma para la evaluación de la estabilidad transitoria en sistemas eléctricos con alta penetración de energías renovables. Este sistema, aplicado sobre una red IEEE-39 modificada, utilizó aprendizaje automático junto con redes generativas antagónicas (GANs) y logró reducir el tiempo de simulación hasta diez veces, manteniendo un error cuadrático medio (MSE) por debajo de 6,2. [38]

En el área de automatización eléctrica en países industrializados ha incorporado técnicas de inteligencia artificial como control difuso, control experto y redes neuronales, que permiten una operación adaptativa, reducen errores humanos, disminuyen costos y aumentan la eficiencia en entornos industriales. [39]

En Ecuador, se implementó un sistema embebido de detección, localización y alerta de fallas de alta impedancia en líneas de distribución media tensión. Utilizando modelos MLP, CNN y SVM entrenados con datos simulados en MATLAB y validados con oscilografías reales, el sistema alcanzó precisiones del 65 % al 95 %, demostrando la viabilidad de la IA en condiciones reales del entorno ecuatoriano. [9]

También en Ecuador, se utilizó una combinación de drones y algoritmos de visión artificial entrenados con Teachable Machine para diseñar redes eléctricas de media tensión en zonas de difícil acceso. Esta metodología redujo un 33 % el tiempo de diseño en tres proyectos reales de la empresa CENTROSUR C.A., evidenciando el impacto operativo de la IA integrada con tecnologías geoespaciales. [5]

Un estudio reciente realizado en Ecuador analiza el papel de la inteligencia artificial como herramienta clave para impulsar la sostenibilidad energética en entornos eléctricos modernos. La investigación demuestra que, mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático, minería de datos y modelos predictivos, se han logrado mejoras sustanciales en la eficiencia operativa, optimización del consumo energético y reducción del desperdicio de recursos. Entre los resultados más destacados, se reporta una disminución del 30 % en el consumo energético, una reducción del 25 % en el desperdicio de materiales y un incremento del 20 % en la eficiencia operativa. Estos hallazgos posicionan a la inteligencia artificial como una herramienta esencial en la modernización sostenible



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



de sistemas eléctricos, y reflejan su impacto creciente dentro del estado del arte internacional en la ingeniería eléctrica[40]

En una revisión académica centrada en contextos de Latinoamérica y Ecuador, se evaluó la aplicación de la inteligencia artificial en redes eléctricas inteligentes, analizando funciones clave como la previsión de demanda, la reducción del flujo energético y la detección temprana de fallas. El estudio identificó que técnicas como las redes neuronales recurrentes (RNN) y los modelos LSTM son herramientas eficaces para predecir el comportamiento dinámico de la demanda, permitiendo ajustar la distribución de energía en tiempo real. Esta investigación muestra cómo la IA está siendo utilizada para transformar sistemas eléctricos tradicionales en arquitecturas más adaptativas y eficientes, destacando su papel como tecnología clave en la transición energética de la región.[6]

2.2.2 Transición de métodos tradicionales a herramientas inteligentes

Durante varias décadas, la operación de los sistemas eléctricos se basó en procedimientos manuales, técnicas deterministas y cálculos estadísticos que requerían participación humana intensa. Las actividades como auditorías energéticas, monitoreo de calidad de potencia, diagnóstico de fallas y estimaciones de carga se realizaban mediante formularios físicos, métodos analíticos y software básico, con capacidades limitadas para responder a condiciones fluctuantes o variantes del sistema. Estos métodos presentaban restricciones en escalabilidad, velocidad de respuesta y precisión ante dinámicas cada vez más complejas.[41]

La evolución tecnológica acarreo herramientas digitales como el software SIMCA-E2, utilizado para el análisis de eficiencia energética y simulación de escenarios operativos dentro de la ingeniería eléctrica mediante modelos lineales. Sin embargo, el avance de la inteligencia artificial y el internet de las cosas IoT lo que transformo tradicionalmente la



manera de operar los sistemas eléctricos. El uso de algoritmos como redes neuronales artificiales, lógica difusa, algoritmos genéticos y técnicas de enjambre ha permitido automatizar procesos clave como el pronóstico de carga, la optimización del consumo, el control dinámico de voltaje y frecuencia, e incluso la toma de decisiones ante la presencia de fallas e interrupciones del sistema.[41]

La implementación de tecnologías IoT, como redes NB-IoT, sensores distribuidos y dispositivos inteligentes, han dado lugar a sistemas interconectados que recopilan procesan y transmiten grandes cantidades de datos (big data) en tiempo real.

Plataformas modernas basadas en computación en la nube han sido incorporadas en infraestructuras como SCADA, sistemas de medición avanzada y gestión energética en edificios inteligentes, fortaleciendo la respuesta adaptativa de la red eléctrica.

El avance de la inteligencia artificial ha sido determinante para automatizar funciones esenciales en los sistemas eléctricos, tales como la restauración del servicio, la anticipación de colapsos de voltaje, la detección de fallas en los sistemas de protección y la estimación de parámetros en redes con alta participación de energías renovables. Gracias al uso de técnicas como redes neuronales profundas, modelos híbridos y sistemas inmunológicos artificiales, ha sido posible dejar atrás los métodos manuales tradicionales, dando paso a plataformas más autónomas, flexibles e inteligentes. Este cambio representa no solo una mejora tecnológica, sino una transformación operativa basada en el análisis de datos y la respuesta dinámica, elementos cruciales para enfrentar las exigencias del entorno energético actual [41].

Por otro lado, el uso de algoritmos de aprendizaje automático y herramientas de análisis de datos ha facilitado la supervisión continua de sistemas, la detección temprana de fallas y la integración más eficiente de fuentes renovables. Este enfoque inteligente ha contribuido a elevar los niveles de eficiencia operativa, confiabilidad y sostenibilidad, superando ampliamente las limitaciones de los métodos tradicionales basados en reglas fijas o intervención manual [42].



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



2.2.3 Tendencias en el uso de inteligencia artificial por tipo de herramienta

Las tendencias actuales en el uso de inteligencia artificial dentro de la ingeniería eléctrica evidencian una transición sostenida desde métodos convencionales hacia enfoques más inteligentes, adaptativos y autónomos. Esta evolución se ha acelerado especialmente en la última década.

Este comportamiento también se observa en otras ramas de la ingeniería. Un estudio publicado en 2021, que analizó artículos indexados entre 2014 y 2020, identificó que las redes neuronales artificiales (ANN) son las herramientas más utilizadas, debido a su capacidad de aprendizaje automático y modelado no lineal sin necesidad de representar el sistema mediante ecuaciones explícitas [43]

A partir de 2017, se destaca un incremento notable en el uso de modelos híbridos que combinan ANN con lógica difusa, algoritmos genéticos o técnicas de optimización como PSO (Particle Swarm Optimization). Estos modelos híbridos buscan mejorar la precisión, la estabilidad y la adaptabilidad frente a condiciones de operación variables.

Este enfoque ha cobrado fuerza en áreas como el pronóstico de carga eléctrica, el mantenimiento predictivo, el control de microrredes y la protección adaptativa. Un artículo publicado en 2024 señala que la IA supera a los métodos tradicionales en eficiencia y capacidad de respuesta, particularmente en sistemas complejos y con múltiples fuentes distribuidas.

Entre las herramientas más aplicadas en los últimos años destacan el aprendizaje profundo, los sistemas difusos, los algoritmos evolutivos y las redes neuronales recurrentes (RNN). Estas últimas, especialmente desde 2020, se han implementado para tareas que requieren procesamiento secuencial de datos, como la predicción de demanda horaria y la estabilidad dinámica de redes [44].

Otra tendencia emergente es el uso de aprendizaje por refuerzo en sistemas que requieren toma de decisiones autónoma, como en el despacho de energía en tiempo real o el control distribuido en redes inteligentes. Estas técnicas se vienen integrando con éxito desde los



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



últimos cinco años, especialmente en escenarios donde las condiciones cambian rápidamente.

A partir de 2021 se observa una creciente integración de herramientas de IA con tecnologías como IoT y big data, permitiendo el desarrollo de sistemas eléctricos más eficientes, resilientes y autoajustables. Esta sinergia tecnológica marca el camino hacia una ingeniería eléctrica inteligente y completamente automatizada [44].

Según una revisión realizada en la base de datos Scopus, la cantidad de publicaciones sobre IA aumentó de manera significativa, pasando de solo 3 artículos en 2018 a más de 36 en 2022. Este incremento refleja el interés creciente de la comunidad académica y tecnológica por incorporar soluciones de IA en distintas disciplinas [45].

Si bien el estudio abarca múltiples áreas, resalta el papel de la ingeniería como uno de los campos con mayor adopción de herramientas de IA. Se destacan aplicaciones en la automatización de procesos, optimización de sistemas y toma de decisiones complejas. Herramientas como el aprendizaje automático, el aprendizaje profundo y el procesamiento del lenguaje natural se encuentran entre las más utilizadas por su capacidad de adaptación, precisión y mejora continua [45].

También se observa que estas técnicas se están integrando de forma transversal en campos como la robótica, la ingeniería biomédica, los sistemas energéticos y el transporte. En el caso de los sistemas eléctricos, la IA permite optimizar la generación y distribución de energía, mejorar la eficiencia energética y gestionar redes inteligentes con base en datos históricos y en tiempo real.

A nivel metodológico, la revisión aplicada en el estudio se apoyó en indicadores como las leyes de Bradford y Lotka, los cuales permitieron identificar tanto las fuentes de mayor impacto como los autores más productivos en este campo. Esto evidencia que la investigación sobre inteligencia artificial se está consolidando como una línea de desarrollo prioritaria dentro de la ingeniería y otras áreas aplicadas.[45]



Asimismo, se señala que el crecimiento de la literatura científica no solo responde a avances técnicos, sino también a la necesidad de abordar desafíos éticos, sociales y legales asociados al uso de estas tecnologías. Esto sugiere una tendencia clara hacia un enfoque más responsable e interdisciplinario en el desarrollo e implementación de herramientas de IA.

2.2.4 Casos de aplicación en Latinoamérica y Ecuador.

En los últimos años, América Latina ha experimentado un crecimiento progresivo en la producción científica relacionada con la inteligencia artificial. Este aumento ha sido especialmente notorio a partir del año 2018, como lo demuestra un análisis bibliométrico realizado en la base de datos Scopus, donde se identificó un incremento sustancial en el número de publicaciones académicas vinculadas al tema.

Países como Brasil, México, Colombia y Argentina se destacan como los principales generadores de conocimiento en este ámbito, principalmente en áreas como la automatización, los sistemas inteligentes, la robótica y la ingeniería aplicada. Aunque estos avances reflejan un interés creciente por parte de la región, también evidencian una concentración de producción científica en ciertas naciones, mientras que otros países, como Ecuador, aún muestran una presencia limitada en cuanto a publicaciones y proyectos consolidados. No obstante, esta tendencia regional sugiere un escenario favorable para la expansión de la inteligencia artificial en diversas aplicaciones del sector eléctrico, particularmente en tareas de predicción, control y optimización de sistemas energéticos.[46]

En Brasil, se desarrolló un sistema innovador basado en aprendizaje profundo para la lectura automática de medidores analógicos de electricidad, dirigidos a mejorar el proceso de registro de consumo en redes aún no equipadas con medidores inteligentes. El estudio se centró en medidores de dial tradicionales utilizados por la compañía energética Copel, que realiza más de 850.000 lecturas mensuales. La solución incluyó la creación de un conjunto de datos público (UFPR-ADMR) y la implementación de modelos de visión computacional como Faster R-CNN y YOLO para la detección y lectura de los diales.

Los resultados obtenidos fueron notables: se alcanzó un F1-score del 100 % en la



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



detección de diales y tasas de reconocimiento del 93,6 % para los diales y del 75,25 % para medidores completos, demostrando el potencial de la inteligencia artificial para modernizar la gestión del consumo energético en infraestructuras convencionales.

En el caso ecuatoriano, se ha desarrollado una solución basada en inteligencia artificial aplicada al diseño de redes de distribución eléctrica. Esta metodología utilizó drones para capturar imágenes aéreas, las cuales fueron procesadas con algoritmos de visión computacional entrenados mediante la herramienta Teachable Machine. El sistema fue implementado en tres proyectos reales gestionados por la empresa Centro Sur C.A., y permitió automatizar el reconocimiento de estructuras eléctricas de media tensión. Aunque la precisión del algoritmo fue moderada (55 %), logró reducir en un 33 % el tiempo destinado a la fase de diseño. Este caso demuestra que, incluso con recursos limitados, la IA puede aplicarse eficazmente en procesos técnicos del sector eléctrico ecuatoriano, especialmente en zonas con dificultades de acceso o geografía compleja. [5]

En la península de Santa Elena, Ecuador, se implementó un sistema embebido que incorpora inteligencia artificial para la detección, localización y generación de alertas ante fallas de alta impedancia (HIF) en redes de distribución eléctrica de media tensión. El sistema empleó modelos de redes neuronales como perceptrones multicapa (MLP), redes convolucionales (CNN) y máquinas de soporte vectorial (SVM), los cuales fueron entrenados con datos simulados en MATLAB/Simulink utilizando una frecuencia de muestreo de 500 muestras por ciclo. Para asegurar la eficiencia del aprendizaje, los datos se dividieron en un 80 % para entrenamiento y un 20 % para validación. Al ser evaluado con datos reales obtenidos de relés de protección, el sistema logró tasas de precisión que oscilaron entre el 65 % y el 95 %. Además, el tiempo promedio de procesamiento en el sistema embebido fue de 16.9 milisegundos, lo que confirma la eficacia de las soluciones basadas en IA para la detección rápida y precisa de fallas en ambientes eléctricos de alta criticidad.[47]

En un estudio desarrollado en Ecuador, se explora cómo la inteligencia artificial se ha convertido en un elemento central para promover la sostenibilidad y la eficiencia



energética dentro de los sistemas eléctricos. La investigación combina minería de datos, algoritmos de aprendizaje automático y análisis cuantitativo para evaluar el impacto de estas tecnologías en la reducción del consumo y el desperdicio de recursos. Los resultados evidencian que la aplicación de IA ha permitido reducir en un 30 % el consumo energético, disminuir en un 25 % los desperdicios asociados al uso de recursos y mejorar la eficiencia de operación en un 20 %. Además, el estudio destaca el uso de modelos de visión artificial y plataformas de monitoreo que facilitan la gestión inteligente de residuos y la integración de fuentes renovables de energía. Estas innovaciones reflejan un cambio significativo respecto a los métodos tradicionales, al plantear una gestión más flexible, adaptable y sostenible de los recursos energéticos en contextos reales del sector eléctrico ecuatoriano.[40]

Un caso relevante en Ecuador sobre el aprovechamiento de la inteligencia artificial para fortalecer la eficiencia energética y avanzar hacia un modelo más sostenible, de tipo documental, señala que la IA es aplicada en el monitoreo y evaluación de equipos eléctricos, lo que permite identificar fallas potenciales antes de que estas se produzcan y optimizar el rendimiento de los sistemas. Además, las herramientas de inteligencia artificial facilitan el procesamiento de grandes volúmenes de datos relacionados con el consumo energético en los sectores residencial, comercial e industrial, lo que posibilita la adopción de medidas correctivas orientadas al ahorro y la reducción de pérdidas. [46]

En síntesis, los casos analizados demuestran cómo la inteligencia artificial ha comenzado a desempeñar un papel clave en la transformación del sector eléctrico en Latinoamérica. Estas tecnologías están permitiendo modernizar infraestructuras, optimizar la operación de los sistemas y fortalecer la sostenibilidad energética en la región. Si bien aún existen retos vinculados a la implementación masiva y a la disponibilidad de recursos tecnológicos, las experiencias en países de Latinoamérica reflejan un avance significativo hacia la adopción de soluciones inteligentes.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



CAPÍTULO III
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque y tipo de investigación:

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto que combina técnicas cuantitativas y cualitativas.

La técnica cuantitativa se aplica a través del análisis bibliométrico, con el fin de cuantificar la producción científica, autores, artículos, entre otros, sobre las herramientas de inteligencia artificial aplicadas a la ingeniería eléctrica.

La bibliometría tiene el potencial de introducir un proceso de revisión sistemático, transparente y reproducible basado en la medición estadística de la ciencia, los científicos o la actividad científica [111]. Permite inferir tendencias a lo largo del tiempo y los temas investigados, identificar cambios en los límites de las disciplinas, detectar a los académicos e instituciones más prolíficos y presentar el panorama general de la investigación existente [112]

Por otro lado, el componente cualitativo permitirá interpretar el análisis sobre las tendencias, áreas de aplicación e impactos tecnológicos, económicos y operativos documentados en la literatura científica.

La investigación es de tipo aplicada, descriptiva y analítica, con un diseño documental y no experimental. Busca generar conocimiento útil para comprender como las herramientas de inteligencia artificial (IA) contribuyen al desarrollo y evolución de la ingeniería eléctrica.

Caracteriza las diferentes herramientas de IA, los casos de uso y el impacto que genera en los sistemas eléctricos. Se basa exclusivamente en el análisis de información científica existente, no manipula variables ni interviene directamente con el objeto de estudio.

3.2 Diseño de la investigación Materiales, equipos y software

El diseño de la investigación es transversal, bibliométrico y no experimental, analiza los datos existentes en fuentes documentales mediante la aplicación de técnicas



bibliométricas y de minería de texto que permite identificar relaciones, tendencias y patrones existentes en la producción científica.

No existe materiales, ya que es una investigación puramente documental que analiza el estado del arte de la aplicación e impacto de las diferentes herramientas de inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica.

3.2.1 Revisión bibliométrica

La revisión bibliométrica se desarrolló a partir de registros científicos encontrados en el procesamiento sistemático mediante la búsqueda abreviada “electrical engineering” AND “artificial intelligence”, la cual complemento la cadena de búsqueda principal con una búsqueda más general orientada a verificar la coherencia de los resultados.

Posteriormente, se procedió a descargar los datos bibliográficos en el formato compatible con Bibliometrix y VOSviewer. Estos registros se sometieron a un proceso de depuración y limpieza mediante la eliminación de duplicados, inconsistencias y datos incompletos con el objetivo de garantizar la calidad del corpus científico.

Una vez obtenida una base de datos sólida, el análisis bibliométrico se efectuó mediante bibliometrix, utilizando la librería de biblioshiny donde se generaron indicadores de tendencia anual de publicación, citación, cocitación y productividad científica juntamente con representaciones de treemaps, histogramas y métricas descriptivas. Con el software VOSviewer se complementó la construcción de mapas de concurrencia, palabras clave, agrupamientos temáticos, autores, colaboraciones científicas, proporcionando una visualización gráfica del comportamiento de los diferentes indicadores en su evolución y concentración temática de la inteligencia artificial aplicada de la ingeniería eléctrica. Este proceso permitió obtener una caracterización cuantitativa y visual del estado del arte.

3.2.2 Revisión sistemática

La revisión sistemática aplicada a la presente investigación tuvo como finalidad identificar y analizar la producción científica reciente relacionada con la aplicación e



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



impacto de las herramientas de inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica, constituyendo la base del estado del arte.

Este proceso se realizó mediante la metodología PRISMA, la cual permitió garantizar la transparencia, trazabilidad y reproducción en la búsqueda y selección de información.

3.2.2.1 Metodología PRISMA

Para la revisión sistemática del estado del arte se aplicó la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)[113], adaptada al ámbito de la ingeniería eléctrica.

Este enfoque permitió estructurar las fases de identificación, selección, elegibilidad e inclusión de los documentos científicos, garantizando un proceso de búsqueda transparente, reproducible y libre de sesgos.

3.2.2.2 Criterio de búsqueda

La estrategia de búsqueda se diseñó utilizando operadores booleanos como AND/ OR, con el objetivo de abarcar estudios relacionados con la aplicación de herramientas de inteligencia artificial en el área de ingeniería eléctrica.

La cadena empleada para la búsqueda de información fue:

("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "neural networks" OR "genetic algorithms" OR "fuzzy logic") AND ("electrical engineering" OR "power systems" OR "electric power systems")

Esta búsqueda fue aplicada a los títulos, resúmenes, y palabras clave de los artículos indexados en las bases seleccionadas, estableciendo un límite de periodo de publicaciones entre 2021 y 2025, filtrando por documentos Open Access con el fin de garantizar la disponibilidad de la información científica completa.

3.2.2.3 Criterios de inclusión

Los artículos fueron seleccionados en base a los siguientes criterios:



- Publicaciones científicas indexadas en Scopus, Web of Science.
- Artículos publicados entre 2021 y 2025
- Artículos que sean únicamente Open Access.
- Estudios enfocados en la aplicación de herramientas de inteligencia artificial (aprendizaje automático, redes neuronales, algoritmos genéticos, lógica difusa, entre otros) en la ingeniería eléctrica.
- Textos escritos en inglés o español
- Investigaciones con enfoque técnico, analítico o aplicado, no puramente teórico.

3.2.2.4 Criterios de exclusión

Se excluyeron los documentos que presentan las siguientes condiciones:

- Publicaciones duplicadas entre bases de datos
- Artículos sin acceso al texto completo o información incompleta
- Estudios fuera del ámbito de la ingeniería eléctrica
- Documentos sin implementación práctica o evidencia de aplicación de herramientas IA.
- Trabajos técnicos sin validación técnicas o resultados
- Publicaciones distintas de los idiomas español o inglés

3.2.2.5 Diagrama de flujo PRISMA

En la **Figura. 1** se presenta el diagrama de flujo que evidencia la recopilación y depuración de la literatura científica desarrollada siguiendo las directrices del protocolo prisma 2020, usado en revisiones sistemáticas por su capacidad para describir de forma clara y verificable las etapas de búsqueda y selección de estudios.

Este procedimiento identificó, filtro y evaluó los documentos relacionados con las herramientas de inteligencia artificial aplicada en la ingeniería eléctrica.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD

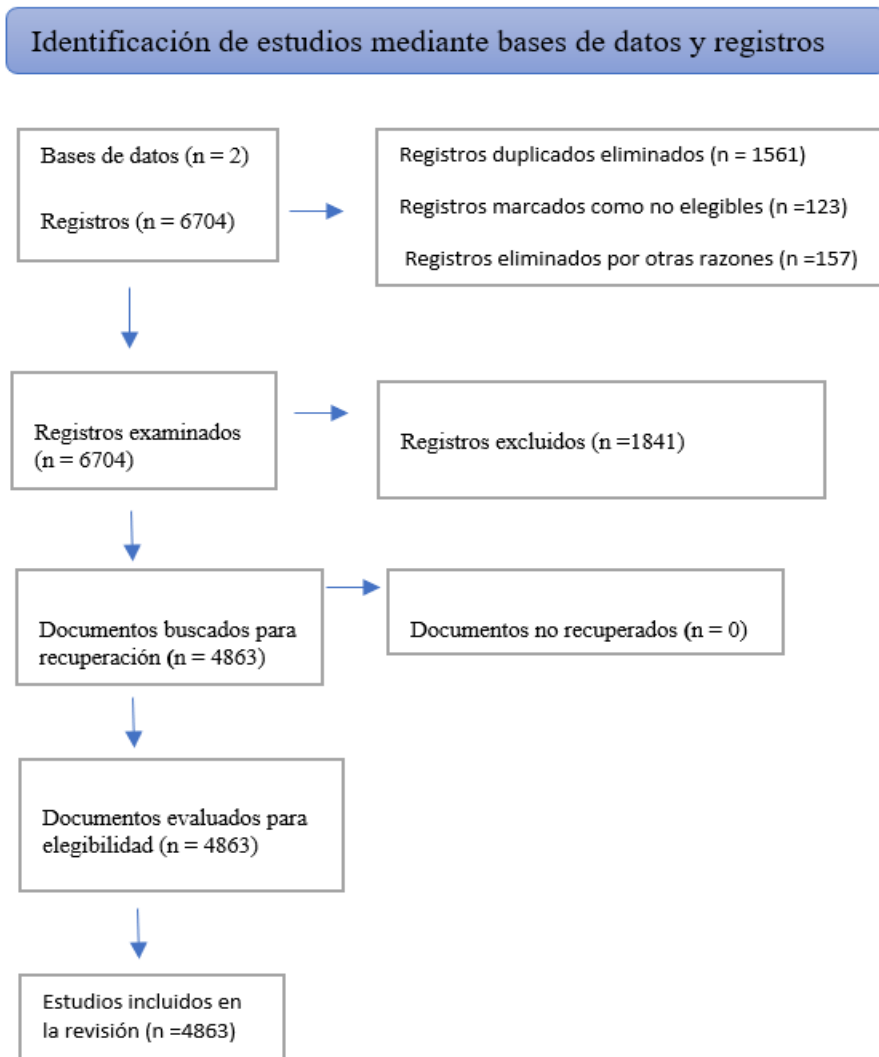


Figura. 1 Diagrama de flujo Prisma

3.3 Softwares y Bases de datos

Los softwares utilizados en la investigación tuvieron un papel fundamental en el desarrollo de esta, tanto en procedimiento, análisis y visualización de la información científica recopilada durante la revisión sistemática.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



El estudio se enmarcó en un enfoque bibliométrico y documental para lo cual fue necesario emplear herramientas computacionales que permitieran gestionar grandes volúmenes de datos, analizar indicadores cuantitativos de producción científica y de representar de forma gráfica las relaciones entre autores, palabras clave y temática de investigación.

Por lo tanto, se seleccionaron dos programas ampliamente utilizados en estudios de carácter bibliométrico, como Bibliometrix, ejecutado en el entorno de programación R, junto a su interfaz gráfica biblioshiny, y VOSviewer, un software especializado en construir y representar visualmente mapas bibliométricos.

3.3.1 Bibliometrix

Uno de los softwares empleados fue el paquete R de Bibliometrix juntamente con su interfaz Biblioshiny el cual proporciona un conjunto de herramientas para la investigación cuantitativa en bibliometría y cienciometría. Está escrito en el lenguaje R, un entorno y ecosistema de código abierto el cual permite visualizar rutinas numéricas de alta calidad y las herramientas integradas de visualización de la información científica, orden y organización de datos, la elaboración de gráficos.[111]

3.3.2 VOSviewer

El software VOSviewer es un programa informático gratuito desarrollado para la construcción y visualización de mapas bibliométricos, de escalamiento multidimensionales basados en distancias, independientemente de la técnica de mapeo utilizada para su creación.[112]

3.4 Equipos y materiales

Los equipos utilizados para el desarrollo de la investigación fue un computador portátil con acceso a internet, el cual permitió acceder a las bases de datos científicas Scopus y Web of Science, así como también facilitó ejecutar los softwares de análisis bibliométrico como Bibliometrix mediante el entorno y su interfaz Biblioshiny y VOSviewer siendo



fundamental para la búsqueda, procesamiento de datos, elaboración de gráficos y redacción de los resultados obtenidos.

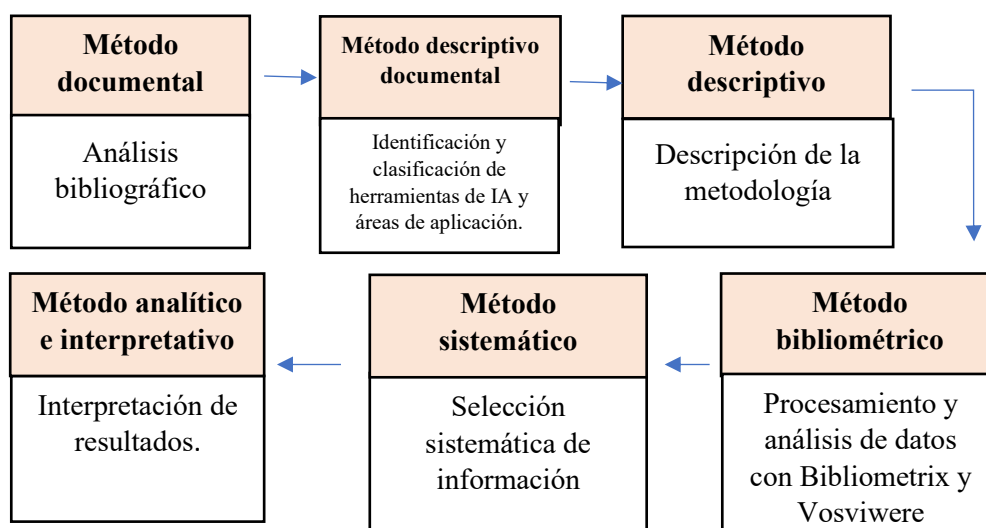
3.5 Métodos, técnicas e instrumentos.

La investigación de carácter documental, descriptiva y bibliométrica, utilizo la aplicación de diferentes métodos complementarios que permitieron abordar el objetivo de estudio desde una perspectiva integral.

Cada método cumplió una función específica dentro del desarrollo y proceso de recolección, organización, análisis e impacto de las diferentes herramientas de inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica. Permitiendo obtener una secuencia lógica de trabajo que inicio con la revisión y análisis bibliográfico, continuo con la identificación, clasificación y descripción sistemática de los documentos, y culmino con el procesamiento e interpretación de resultados.

Los métodos aplicados garantizan la coherencia, validez y rigor científico de estudio, al ser cuantitativo y cualitativo dentro del marco de la revisión sistemática del estado del arte.

En la **Figura. 2** se presenta el flujograma metodológico que resume los diferentes métodos empleados en la investigación los cuales se desarrollaron de manera secuencial y complementaria.





UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Figura. 2 Flujograma metodológico para el análisis bibliométrico sobre herramientas IA en Ingeniería Eléctrica

3.5.1 Método Documental

El método documental que se aplicó para la construcción del corpus científico que sustenta la investigación. A través de este enfoque se realizó una búsqueda, recopilación y análisis exhaustivo de fuentes académicas y técnicas relacionadas con la aplicación e impacto de las herramientas de inteligencia artificial IA en la ingeniería eléctrica.

Para ello, se revisaron bases de datos de alto impacto como Web of Science, Science Direct y Scopus, estas bases científicas fueron seleccionadas por su rigor y cobertura dentro de las áreas de ingeniería.

Se emplearon estrategias de búsqueda mediante el uso de operadores booleanos y combinaciones de palabras clave en inglés y español que incluyeron términos como “artificial intelligence”, “machine learning”, “deep learning”, “neural networks”, “genetic algorithms” y “electrical engineering”.

También se aplicaron criterios de exclusión e inclusión considerando únicamente artículos científico, revisiones y conferencias de alto impacto, permitiendo reunir y organizar de manera sistemática la información científica para el desarrollo bibliométrico estableciendo una base sólida para el estudio del estado del arte.

3.5.2 Método descriptivo documental

El método descriptivo documental se utilizó en la investigación para identificar, clasificar y organizar las herramientas de IA y sus respectivas áreas de aplicación dentro de la ingeniería eléctrica.

Mediante este método se describieron las principales herramientas empleadas como redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos, lógica difusa y aprendizaje profundo. Se estableció una categorización temática del material científico obtenido en la revisión documental, facilitando la comprensión y sirviendo de base para la descripción metodológica y el posterior análisis cuantitativo.



3.5.3 Método descriptivo

Este método se empleó para explicar y detallar con precisión el procedimiento metodológico aplicado en la investigación con el objetivo de garantizar coherencia y claridad del estudio.

Permitió organizar las etapas del proceso, desde la búsqueda sistemática hasta el análisis de los resultados, definiendo los diferentes criterios de inclusión, exclusión y depuración de los documentos. De esta manera el describir las herramientas computacionales utilizadas, los parámetros de análisis aplicados y estrategias de representación visual de los datos bibliográficos obtenidos.

3.5.4 Método Bibliométrico

Este método fue implementado para el procesamiento, análisis estadístico y representación visual de la información científica documental recopilada, permitiendo cuantificar la producción académica sobre las herramientas de IA inmersas dentro de la ingeniería eléctrica, identificando diferentes variables de análisis cuantificables como autores, instituciones, países, revistas, palabras clave, citas y años de publicación.

3.5.5 Método sistemático

Con el fin de organizar y depurar la revisión del estado del arte de manera controlada, se utilizó el método sistemático, asegurando así la validez y trazabilidad del proceso. Se fundamentó en las pautas de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)[113], que fue adaptada para el ámbito de la ingeniería eléctrica.

Con este procedimiento se llevó a cabo una búsqueda planificada, así como la eliminación de duplicados y la elección de documentos basándose en criterios establecidos. El diagrama PRISMA se utilizó para documentar el flujo metodológico, lo que posibilitó la visualización de las fases de identificación, selección, elegibilidad e inclusión de los artículos examinados.

De esta manera, el procedimiento sistemático aseguró que el proceso de revisión bibliográfica pudiera ser transparente y reproducible.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



3.5.6 Método analítico e interpretativo

Para analizar los resultados alcanzados y deducir conclusiones importantes acerca de cómo la inteligencia artificial afecta a la ingeniería eléctrica, se utilizó el método analítico e interpretativo en la etapa final del estudio. Esta técnica permitió la conexión del análisis cuantitativo (bibliométrico) con la interpretación cualitativa de las tendencias detectadas, relacionando los descubrimientos con los entornos tecnológicos, académicos y científicos contemporáneos.

Mediante esta perspectiva, se analizaron los patrones de cooperación, el desarrollo temático y la incidencia de las herramientas de inteligencia artificial en varios subcampos de la ingeniería eléctrica, lo que ayudó a entender crítica e integralmente el estado del arte.

En este capítulo se presentó toda la metodología aplicada en la investigación, describiendo cada uno de los métodos utilizados, los criterios establecidos para la revisión sistemática y los softwares utilizados para el análisis bibliométrico. La integración de los métodos documental, descriptivo, sistemático y bibliométrico conforma un marco metodológico sólido que asegura la validez, confiabilidad y consistencia de los resultados de esta investigación.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

**4.1 Casos de uso de herramientas de inteligencia artificial en sistemas eléctricos:
Análisis bibliométrico**

En esta sección se presentan los resultados del análisis bibliométrico con el objetivo de identificar los principales casos de uso de las diferentes herramientas de inteligencia artificial que son aplicadas a los sistemas eléctricos.

Este análisis se basa en los artículos seleccionados mediante la revisión sistemática la cual, utiliza indicadores bibliométricos como la frecuencia y concurrencia de keywords, así como la identificación de clústeres temáticos, con el fin de caracterizar las aplicaciones más importantes y recurrentes encontradas en la literatura reciente.

4.1.1 Identificación bibliométrica de casos de uso más frecuente

A continuación, se presenta los principales resultados obtenidos del análisis bibliométrico con el fin de identificar los casos de uso de las diferentes herramientas de inteligencia artificial en el área eléctrica. Este análisis permitió reconocer patrones en la producción científica y tendencias de investigación que se asocian al desarrollo y aplicación de estas herramientas, mediante el procesamiento y organización de los registros obtenidos de las bases bibliográficas, donde se analizaron diferentes indicadores bibliométricos que permitieron comprender la evolución investigativa en esta temática, tales como la producción anual, citas promedio, fuentes de mayor relevancia, producción científica por países y three field plots los cuales permitieron identificar la relación existente entre tres variables como palabras clave, países, abstract o afiliaciones institucionales.

4.1.1.1 Producción científica anual

En la **Figura. 3** se muestra la producción científica anual correspondiente al periodo 2021-2025 que se obtuvo del análisis bibliométrico realizado en Bibliometrix, unificando las bases de datos de Scopus y Web of Science. El gráfico muestra una distribución del



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



número de artículos publicados por año dentro del conjunto de datos analizados, lo que permite la visualización de la evolución temporal de la producción científica.

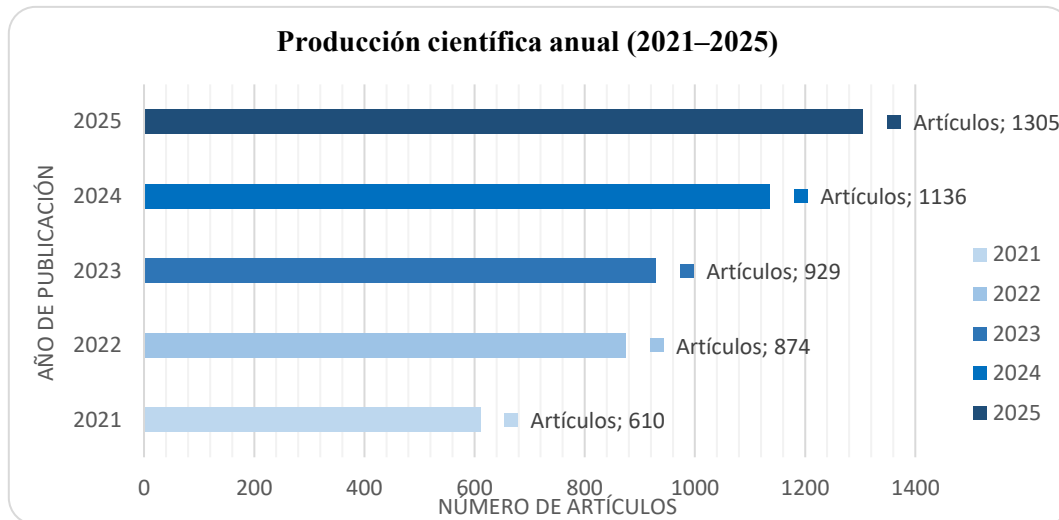


Figura. 3 Producción científica anual en el periodo 2021- 2025, análisis bibliométrico

En el año 2021 se registraron 610 publicaciones, que constituyo el punto de partida del periodo estudiado, lo que representa aproximadamente el 12,5% del total de artículos registrados. Para 2022 la producción científica aumento notablemente a 874, lo que corresponde al 18 %, con 264 artículos más que el 2021. Esta tendencia creciente continua en 2023 con 929 publicaciones, aproximadamente el 19,2% del total, lo que consolida esta temática dentro de la comunidad científica.

El crecimiento se intensifica en el año 2024 donde se identificaron 1136 artículos publicados, siendo el 23,3 % lo que marca una expansión notable de la producción científica y un mayor interés investigativo en el uso de herramientas de IA dentro de la ingeniería eléctrica, para 2025 la producción científica alcanza su máximo valor con 1305 publicaciones que representa el 27% con mayor volumen de trabajos científicos del periodo evaluado. Los resultados reflejados en la **Figura. 3** evidencian una dinámica de crecimiento continuo de la producción científica, lo que coloca a la inteligencia artificial



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



como un eje transversal y estratégico en la investigación contemporánea en ingeniería eléctrica.

Esta tendencia justifica el análisis bibliométrico realizado y respalda el enfoque del presente estudio orientado a identificar las principales herramientas de IA, aplicaciones e impacto desde una perspectiva del estado del arte.

4.1.1.2 Citas promedio por año

En la **Figura 4** se presenta la distribución del promedio de citas por año durante el periodo 2021- 2025, la representación gráfica resume los valores promedios obtenidos del análisis en Bibliometrix que permiten identificar su comportamiento temporal en función del año de publicación, considerando los datos bibliográficos obtenidos unificados.

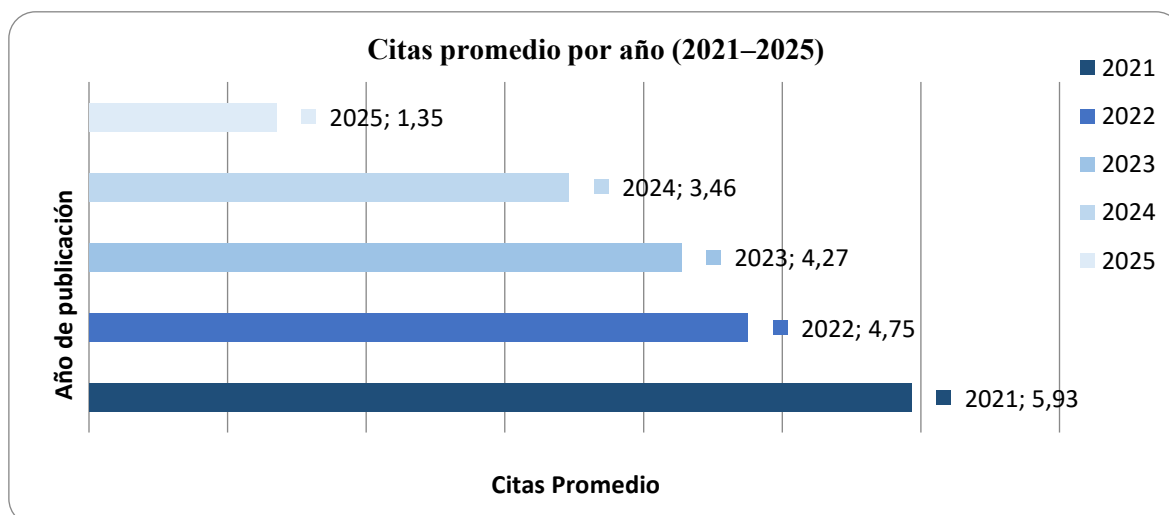


Figura. 4 Diagrama de barras de citas promedio por año (2021–2025)

Para el año 2021 se tiene el valor más alto de citas promedio por año con un 5,93 citas por artículo, lo que corresponde aproximadamente a 30 % del total acumulado dentro del periodo analizado. Este valor se asocia al mayor tiempo de exposición de los artículos publicados dentro de ese año, lo que ha permitido una mayor acumulación de citas en la literatura científica referente a la temática abordada.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



En 2022, el promedio de citas en este año presenta una ligera reducción a 4,75 lo que equivale al 24 % manteniéndose en un nivel considerablemente de alto impacto. Posteriormente en 2023 el valor continua en descenso a 4,25 de citas promedio, correspondiente a un 21,5%, representando una progresiva reducción en comparación con los años anteriores.

Para 2024 el promedio de citas recae en 3,46 equivalente al 17,6% del total, mientras que en el año 2025 se registra el valor más bajo de citas promedio con un valor de 1,35 que en porcentaje representa el 6,9%. Esta disminución en los años más recientes como 2024 y 2025 es consistente con el menor tiempo transcurrido desde la publicación de los artículos científicos, por lo cual limita su capacidad de acumulación de citas.

4.1.1.3 Fuentes de mayor relevancia

En la **Figura 5** se muestra las principales fuentes de publicación según el número de artículos obtenidos a partir del análisis bibliométrico realizado, con los registros unificados de Scopus y Web of Science. Se observa en el grafico la distribución del volumen de publicaciones entre las revistas más representativas del tema de estudio, donde se destacan aquellas con mayor número de documentos indexados dentro del conjunto de datos analizado.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Fig. 5 Principales fuentes de publicación según número de artículos

A partir de análisis bibliométrico se muestran resultados con una alta concentración de publicaciones en un número reducido de fuentes. La revista IEEE Access representa un mayor número de artículos publicados dentro del intervalo de tiempo establecido, con 652 artículos publicados que corresponden al 20,1% del total posicionándose en primer lugar como una fuente de alto impacto y relevancia dentro de la investigación científica. En segundo lugar, se ubica Energies, con un total de 590 artículos equivalente al 18,2%, consolidándose como una de las revistas más relevantes para la difusión de investigaciones relacionadas con inteligencia artificial dentro de la ingeniería eléctrica.



En nivel de contribución se encuentran Energy Reports, con un total de 234 artículos correspondiente al 7,2%, Frontiers in Energy Research con 198 artículos equivalente al 5,8%, estos 4 fuentes concentran un total de 51,3% de la producción científica analizada, lo que evidencia un patrón de centralización editorial en la difusión del conocimiento sobre inteligencia artificial aplicada en el área eléctrica.

También se identifican revistas especializadas en sistemas eléctricos y de potencia, como International Journal of Electrical Power and Energy Systems con 89 articulo publicados que corresponde al 2,7%, Sensor con 84 artículos equivalente a 2,6% e IET Renewable Power Generation con 82 artículos equivalente a 2,5%. Otras fuentes entre ellas Sustainability (Switzerland) con 73 artículos; 2,3 %, IET Generation, Transmission and Distribution con 66 artículos; 2,0 % y Applied Sciences con 64 artículos; 2,0 %, aportan de manera sostenida a la diversificación temática del campo.

El resto de las revistas, como Electric Power Systems Research, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Electronics, Scientific Reports e International Transactions on Electrical Energy Systems, presentan contribuciones individuales inferiores al 2 %, pero en conjunto representan una fracción significativa de la producción científica, lo que muestra evidencia de amplitud y heterogeneidad de las fuentes de publicación empleados en el periodo 2021-2025.

En sí, la figura muestra que la investigación científica sobre herramientas de inteligencia artificial dentro de la ingeniería eléctrica está siendo difundida principalmente por revistas internacionales de acceso abierto que han sido complementadas por publicaciones técnicas en sistemas de potencia y energía.

4.1.1.4 Producción científica por países

La **Figura. 6** de producción científica por países muestra una distribución geográfica heterogénea de las publicaciones a nivel mundial. Se observa que un grupo reducido de países concentra la mayor cantidad de artículos, destacándose aquellos con mayor intensidad de color en el mapa, mientras que el resto de los países presenta una



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



del país líder China. Todos estos países se caracterizan por desarrollo tecnológico y por su amplia adopción de técnicas de inteligencia artificial en sistemas eléctricos, control y automatización.

En países de America Latina, Africa y algunas regiones de Oceania presentan una baja contribución reflejada en tonalidad más clara en el mapa, sin embargo, no quiere decir ausencia de investigación, sino una participación menos intensiva en comparación con países líderes, lo que genera una brecha geográfica en la generación de conocimiento científico en este campo.

Por tanto, la figura muestra que la investigación sobre inteligencia artificial aplicada en ingeniería eléctrica se encuentra mayormente en Asia, Norte America y Europa, mientras que el resto de los países presenta una contribución más limitada. Estos resultados evidencian la existencia de polos regionales de desarrollo científico y tecnológico, una contribución desigual de la producción académica a nivel mundial.

4.1.1.5 Top 20 países con mayor número de artículos publicados

En la **Figura. 7** se muestra la producción científica de los 20 países con mayor número de artículos publicados, obtenida del análisis bibliométrico del conjunto de registros considerado, el gráfico de barras permite visualizar la distribución de publicaciones por país, identificando aquellos con mayor y menos presencia en la producción científica dentro del periodo 2021- 2025.

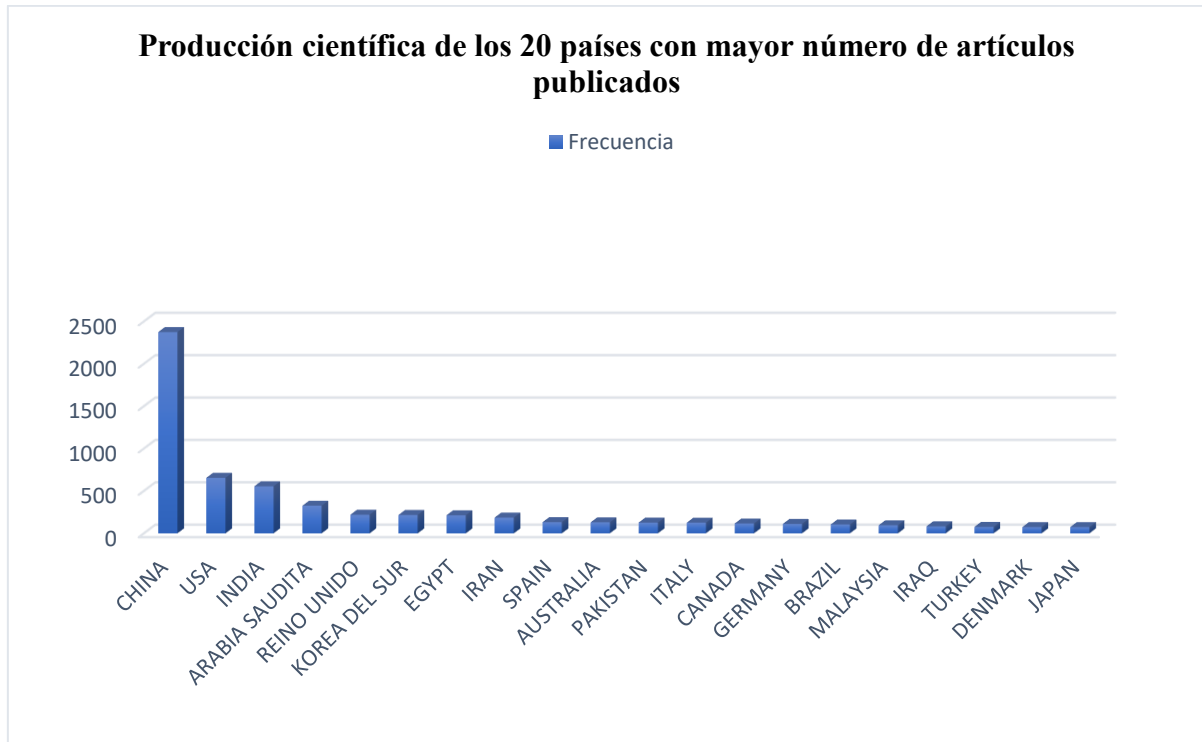


Figura. 7 Producción científica de los 20 países con mayor número de artículos publicados

Los resultados obtenidos complementan el análisis geográfico previo que presenta el ranking de los 20 países con mayor contribución en publicaciones científicas, lo que permite evaluar el nivel de concentración de artículos publicados. La asimetría de resultados muestra un país líder que mantiene una producción superior al resto, seguido por un grupo reducido de países que tienen niveles intermedios de publicación. En el décimo país, Australia, la producción tiende a estabilizarse con valores menores, lo que evidencia que la investigación sobre el tema de estudio se encuentra concentrada en pocos países.

4.1.1.6 Relación por países, palabras clave y afiliaciones institucionales

La siguiente **Figura. 8** muestra un three- field plot que representa la relación entre países de origen de los autores, palabras clave y afiliaciones institucionales. Permite identificar las conexiones entre estos tres campos, evidenciando como algunos países se vinculan



con conjuntos específicos de términos de investigación y con instituciones académicas y de investigación.

Para su interpretación, los países han sido agrupados por continentes, lo que permite identificar patrones regionales en la producción científica, las líneas pioneras e instituciones más influyentes.

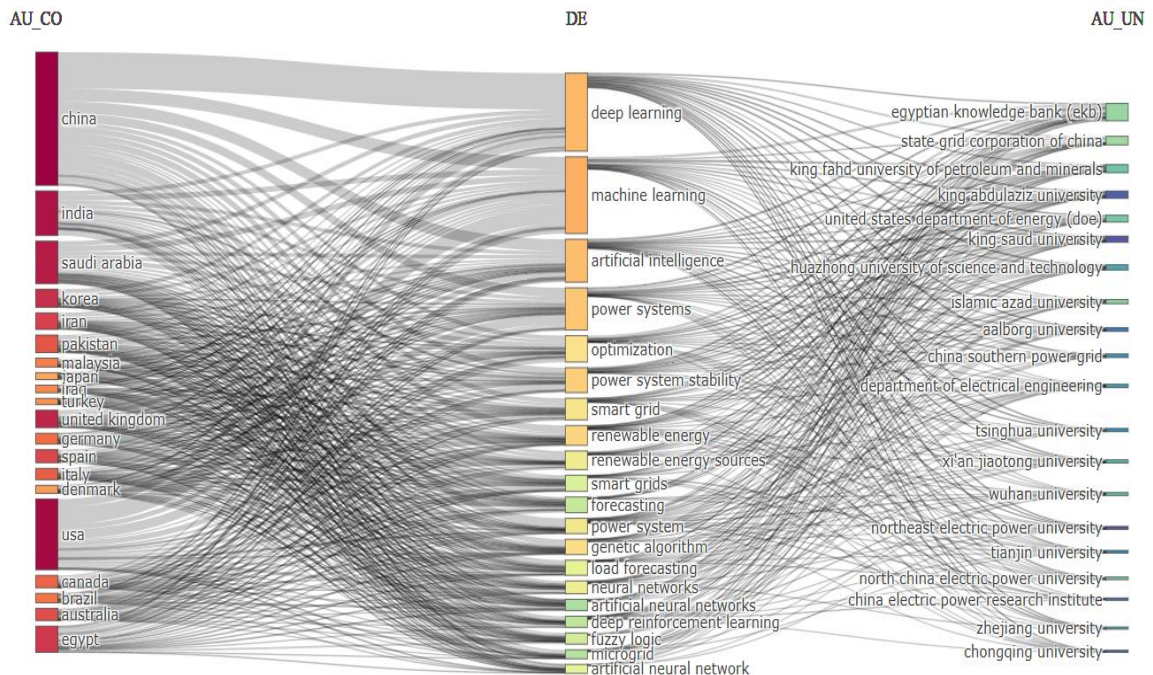


Figura. 8 Relación por países, keywords y afiliaciones institucionales

Desde una perspectiva continental, se muestra a Asia con mayor concentración de conexiones en los 3 campos analizados. Países como China, India, Corea del Sur y Pakistán presentan una vinculación con palabras clave como *deep learning*, *machine learning*, *artificial intelligence*, *power systems* y *optimization*, estas conexiones se asocian con universidades y centros de investigación de alto impacto, lo que muestra el liderazgo asiático en el desarrollo y aplicación de herramientas de inteligencia artificial



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



en ingeniería eléctrica, donde se destaca particularmente sistemas de potencia, redes inteligentes y optimización.

Destacan países como Arabia Saudita, Irán y Egipto de la región de Medio Oriente, los cuales muestran una relación consistente con términos como *renewable energy*, *power system stability* y *Smart grid*. Por otro lado, las afiliaciones institucionales vinculadas a esta región tienen una notable orientación hacia aplicaciones energéticas estratégicas que se alinean con la política de diversificación energética y modernización de infraestructura eléctrica.

En el continente europeo se presenta una contribución distribuida entre países como España, Italia, Reino Unido y Dinamarca, donde en su vinculación de palabras clave destacan *renewable energy sources*, *forecasting*, *Smart grids* y *power systems*. Las instituciones europeas evidencian integración equilibrada entre investigación aplicada y desarrollo tecnológico, lo que demuestra que mantienen un enfoque orientado a la sostenibilidad, eficiencia energética y estabilidad de los sistemas eléctricos.

Para el caso de América del Norte, principalmente Estados Unidos y Canadá, se observa una conexión de relevante con términos asociados a artificial *intelligence*, *neural networks* y *optimization*, las cuales están asociadas a universidades y organismos con una alta producción científica. Esta región es caracterizada por tener una fuerte interacción entre investigación académica y desarrollo tecnológico, lo que le da el papel como polo de innovación en inteligencia artificial aplicada en la ingeniería eléctrica.

4.1.1.7 Relación entre países, palabras clave y términos del resumen

En la **Figura. 9** presenta un three-field plot que muestra la relación entre los países de origen de los autores, las palabras clave y los términos extraídos de los resúmenes (abstracts) de los documentos analizados. La imagen permite observar las conexiones existentes entre estos tres campos, reflejando cómo determinados países y conjuntos de palabras clave se vinculan con los términos más frecuentes en los resúmenes de las publicaciones incluidas en el conjunto de datos considerado.

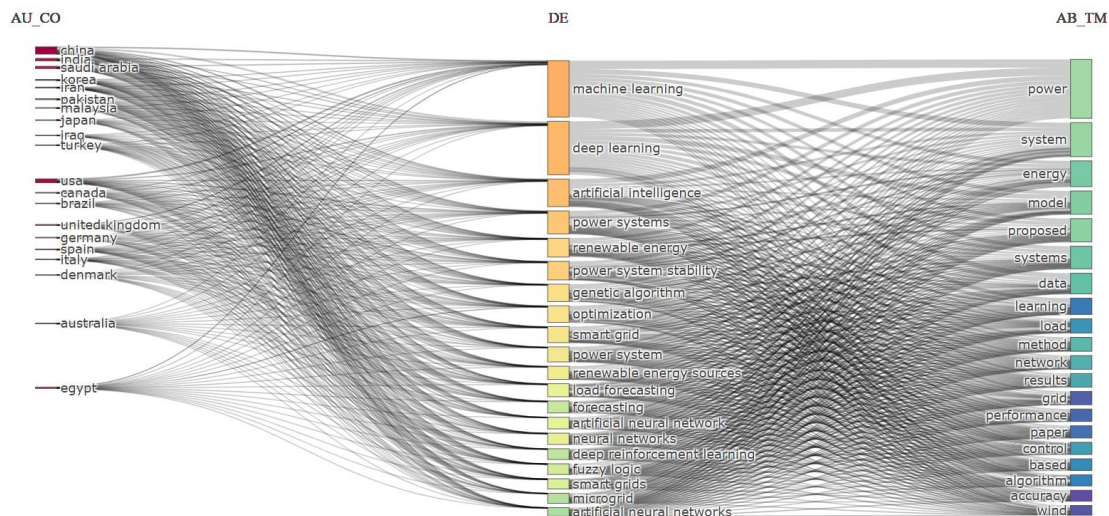


Figura. 9 Relación entre países, palabras clave y términos del resumen

En cuanto a países se observa que países asiáticos tienen una mayor predominancia, donde vuelve a destacar China, India, Arabia Saudita, Corea, Pakistan, Malasia y Japon, que son seguidas por países de America del Norte y Europa, en cuanto a palabras clave, las más representativas corresponden a *machine learning* y *artificial intelligence*, actuando como nodos centrales que conectan a la mayoría de los países con los términos de resumen. También se identifican palabras clave relacionadas directamente a ingeniería eléctrica como *power system*, *power system stability*, *renewable energy*, *Smart grid*, *optimization*, *genetic algorithm*, *neural networks*, *load forecasting* y *fuzzy logic*, lo que demuestra que existe una integración de varias técnicas de inteligencia artificial en aplicaciones energéticas y de potencia.

En términos de resumen, se observa una alta frecuencia de conceptos como *power*, *system*, *energy*, *model*, *learnig*, *method*, *networks*, *grid*, *control* y *algorithm*. Esto confirma que los estudios no solamente se enfocan en el desarrollo teórico de algoritmos de inteligencia artificial, sino también en su aplicación práctica, rendimiento, modelado de sistemas eléctricos y análisis de resultados.

Estos resultados obtenidos por el three field plot evidencian una coherencia temática entre las herramientas de inteligencia artificial utilizadas con el origen geográfico de las



investigaciones y los enfoques abordados en los resúmenes de los artículos. La **Figura 9** demuestra que la investigación se centra en modelado, optimización, control, análisis de potencia y energía, con técnicas de aprendizaje automático y profundo. Este patrón refuerza la validez del estado del arte identificado permitiendo comprender como se estructura el conocimiento científico en este campo a nivel internacional.

4.1.1.8 Países más citados

En la siguiente imagen (**Figura. 10**) se muestra los países con mayor número de citas científicas acumuladas a nivel mundial, el grafico de barras permite observar la distribución del volumen total de citas por país, donde se identifica aquellos con mayor impacto en términos de citación dentro de los resultados de las bases bibliográficas unificadas obtenidas en Blibliometrix. Este indicador permite evaluar el impacto científico que complementa el análisis previo basado en el número de publicaciones.

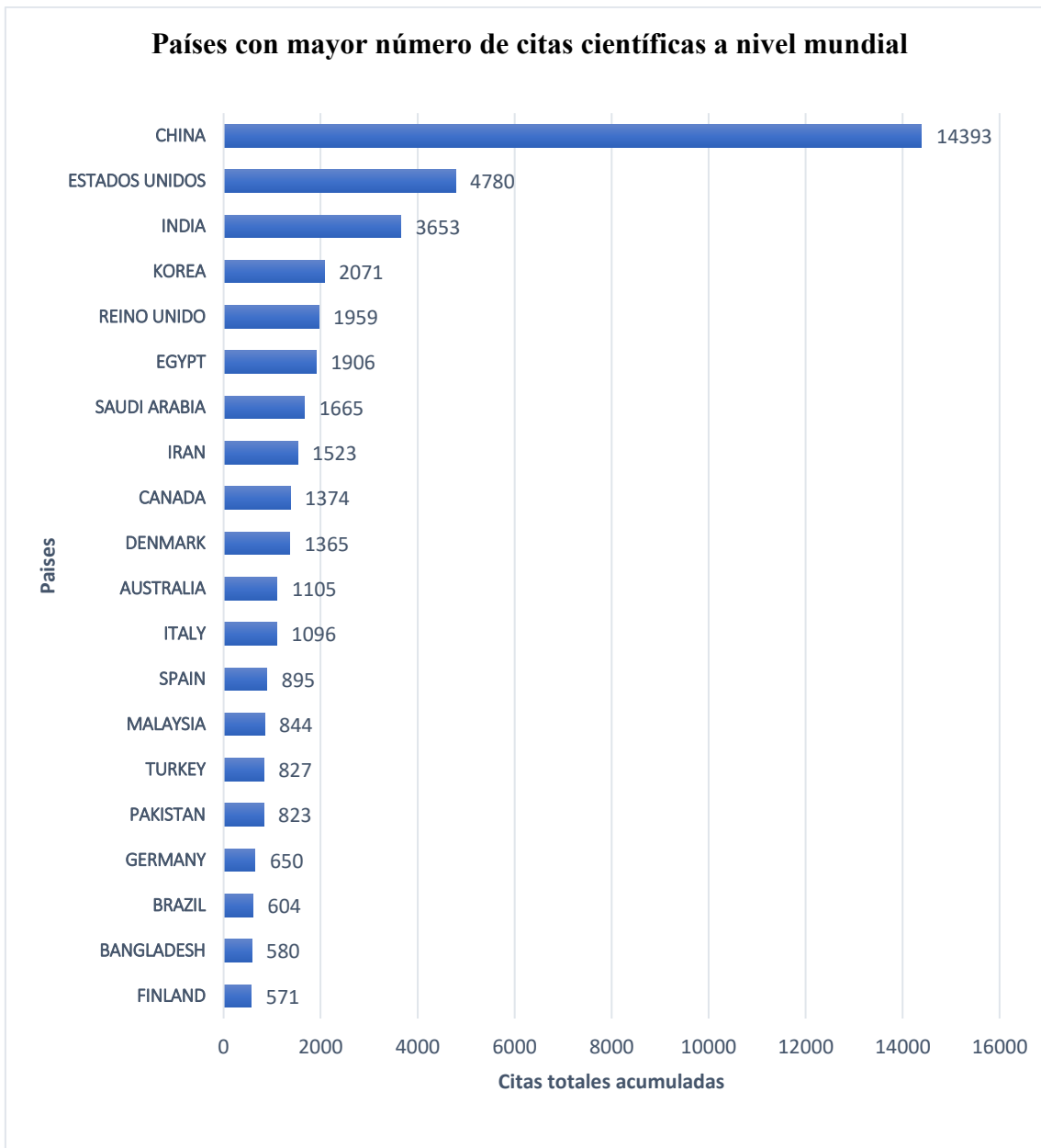


Figura. 10 Países con mayor número de citas científicas a nivel mundial

Como en resultados anteriores, China evidencia un liderazgo amplio con respecto a otros países, con 14393 citas acumuladas, que corresponde aproximadamente a 39,7% del total de citas, este valor además de reflejar un alto volumen de publicaciones, también se visualiza su influencia de investigación en la literatura científica internacional.



Otro de los países con mayor relevancia de número de citas es Estados Unidos, con 4780 citas que corresponde a 13,2%, seguido por India con 3653 citas (10,1%). Estos dos países conforman un grupo con un significativo impacto científico, aunque existe una brecha considerable con respecto a China. Como nivel intermedio se encuentran países como Corea con 2071 citas; 5,7%, Reino Unido con 1959; 5,4%, y Egipto con 1906; 5,3%, y así mismo países como Arabia Saudita, Irán, Canadá y Dinamarca presentan valores de citación acumulada entre 1365 y 1665 citas aproximadamente, lo que representa un impacto moderado pero sostenido dentro de la comunidad científica.

Finalmente, países como Australia, Italia, España, Malasia, Turquía, Pakistán, Alemania, Brasil, Bangladesh y Finlandia registran valores inferiores a las 12000 citas, lo que indica una contribución limitada en términos de impacto global debido a diferentes factores como menor volumen de publicaciones, menor antigüedad de artículos, el alcance de revistas de publicación e incluso el grado de integración en redes internacionales de investigación.

4.1.1.9 Trabajos globales más citados

La **Tabla 1** presenta artículos científicos con mayor número de citas globales, relacionados con la aplicación de herramientas de inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica, que fueron identificados a partir del análisis bibliométrico de la base de datos unificada de Scopus y Web of Science. Para cada artículo se muestra el total de citas, citas promedio por año, y el total de citas normalizadas, lo que permite evaluar el impacto acumulado y el impacto relativo en función del tiempo de publicación de los artículos.

Tabla 1. Artículos científicos con mayor número de citas globales

Artículos científicos con mayor número de citas globales				
Papel	DOI	Citas totales	TC por año	TC normalizado
DAI Y, 2021, IEEE TRANS GEOSCI REMOTE SENS	10.1109/TGRS.2020.3044958	630	105,00	21,24
ZHAO S, 2021, IEEE T POWER ELECTR	10.1109/TPEL.2020.3024914	516	86,00	17,40



HAYDARI A, 2022, IEEE T INTELL TRANSP	10.1109/TITS.2020.3008612	411	82,20	21,63
RAFI S, 2021, IEEE ACCESS	10.1109/ACCESS.2021.3060654	274	45,67	9,24
ABUMOHSN M, 2023, ENERGIES	10.3390/en16052283	274	68,50	21,37
LI Y, 2023, APPL ENERGY	10.1016/j.apenergy.2022.120291	232	58,00	18,10
AHMAD N, 2022, IEEE ACCESS	10.1109/ACCESS.2022.3187839	230	46,00	12,11
KO M, 2021, IEEE TRANS SUSTAINABLE ENERGY	10.1109/TSTE.2020.3043884	225	37,50	7,59
ABIR S, 2021, IEEE ACCESS	10.1109/ACCESS.2021.3067331	223	37,17	7,52
BASHIR T, 2022, ENERGY REP	10.1016/j.egy.2021.12.067	219	43,80	11,53
ZHANG Y, 2021, IEEE T SMART GRID	10.1109/TSG.2020.3010510	216	36,00	7,28
ORESHKIN B, 2021, APPL ENERGY	10.1016/j.apenergy.2021.116918	213	35,50	7,18
WU Q, 2021, IET RENEW POWER GENER	10.1049/rpg2.12085	203	33,83	6,84
LUO X, 2021, ENERGY	10.1016/j.energy.2021.120240	198	33,00	6,68
LI Y, 2022, IEEE TRANS IND INF	10.1109/TII.2021.3098259	195	39,00	10,26
MASSAOUDI M, 2021, IEEE ACCESS	10.1109/ACCESS.2021.3071269	184	30,67	6,20
VEERASAMY V, 2021, IEEE ACCESS	10.1109/ACCESS.2021.3060800	182	30,33	6,14
DING Y, 2022, RENEW ENERGY	10.1016/j.renene.2022.02.108	177	35,40	9,32
BELAGOUNE S, 2021, MEASUREMENT	10.1016/j.measurement.2021.109330	173	28,83	5,83
ANTHI E, 2021, J INF SECUR APPL	10.1016/j.jisa.2020.102717	172	28,67	5,80

En la **Tabla 1** se muestra que el artículo con mayor impacto global corresponde a *Dai* y colaboradores correspondiente al año 2021, publicado en *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, con 630 citas totales, un promedio de 105 citas por año y 21,24 de citas normalizadas, lo que indica una alta visibilidad y relevancia sostenida en la literatura científica. El trabajo realizado por *Zhao et al. (2021)* en *IEEE Transactions on Power Electronics* registra 516 citas, consolidándose como uno de los estudios más influyentes en el periodo analizado.

Como segundo grupo de artículos que presenta un alto impacto significativo, se tiene los trabajos de *Haydari et al. (2022)* y *Rafi et al. (2021)*, con valores de citación total superiores a las 400 citas, publicados en revistas de alto impacto como *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* e *IEEE Access*. Estos artículos destacan también por mantener promedios elevados de citas anuales, manteniendo una vigencia constante dentro del estado del arte.



También se identifican artículos con valores moderados comprendidos entre 200 y 300 citas, publicados en revistas como *Energies*, *Applied Energy*, *IEEE Access* y *IEEE Transactions on Smart Grid*. En este grupo, el indicador de citas normalizadas permite observar que algunos trabajos recientes alcanzan niveles de impacto comparables a artículos más antiguos, lo que refleja una rápida adopción y difusión de sus aportes en la comunidad científica.

La tabla pone de manifiesto que los artículos más citados se concentran principalmente en revistas internacionales de alto impacto, muchas de ellas pertenecientes al entorno IEEE, así como en revistas multidisciplinarias del área de energía. Además, el uso conjunto de métricas de citación total, citas por año y citas normalizadas permite una evaluación más equilibrada del impacto científico, evitando sesgos asociados únicamente a la antigüedad de las publicaciones.

4.1.2 Análisis de co-ocurrencia en VOSviewer

Con el propósito de identificar las estructuras temáticas dominantes y las relaciones conceptuales entre los principales términos de investigación, se presenta un análisis de concurrencia de palabras clave mediante la herramienta VOSviewer, utilizando exclusivamente los registros indexados en la base de datos Web of Science. Este análisis permite visualizar los núcleos de investigación más relevantes y su grado de interconexión, proporcionando una comprensión más profunda de las tendencias y enfoques predominantes en la aplicación de la inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica.

4.1.2.1 Análisis de co-ocurrencia de palabras clave mediante VOSviewer (Web of Science)

La **Figura. 11** presenta el mapa de concurrencia de palabras clave generado mediante VOSviewer, a partir de los registros extraídos exclusivamente de la base de datos Web of Science. El análisis de co-ocurrencia permite identificar las principales líneas temáticas, así como las relaciones conceptuales entre los términos más frecuentes en la literatura científica relacionada con la aplicación de inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



El tamaño de los nodos representa la frecuencia de aparición de los términos, mientras que los enlaces indican el grado de asociación entre ellos.

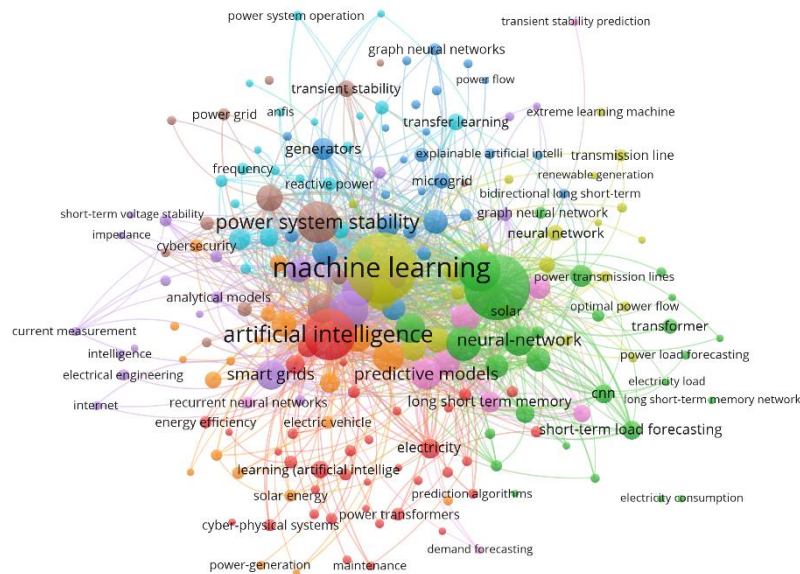


Figura. 11 Análisis de concurrencia en VOSviewer con bases bibliográficas de Web of Science

El mapa evidencia una estructura temática claramente centralizada, donde machine learning emerge como el nodo de mayor tamaño y conectividad, posicionándose como el eje principal del campo de estudio. Este término presenta una fuerte relación con conceptos como artificial intelligence, neural network, predictive models y long short-term memory, lo que confirma el papel predominante del aprendizaje automático y profundo en las aplicaciones actuales de la ingeniería eléctrica.

Un segundo núcleo relevante está asociado a power system stability, el cual se vincula estrechamente con términos como generators, reactive power, frequency, transient stability, power flow y power grid operation. Este clúster refleja una línea de



investigación orientada al análisis, control y predicción del comportamiento dinámico de los sistemas eléctricos de potencia mediante técnicas basadas en inteligencia artificial.

Asimismo, se identifica un clúster enfocado en neural networks y deep learning, conectado con aplicaciones específicas como load forecasting, short-term load forecasting, electricity consumption, power transmission lines y optimal power flow. Este grupo temático evidencia el uso intensivo de modelos neuronales avanzados para tareas de predicción, optimización y planificación en sistemas energéticos.

Otro conjunto de términos se relaciona con smart grids, energy efficiency, electric vehicles, cyber-physical systems y cybersecurity, lo que indica una línea de investigación orientada a la modernización de las redes eléctricas, la integración de nuevas tecnologías y la gestión inteligente de la energía. La presencia de estos términos sugiere una convergencia entre inteligencia artificial, digitalización y sistemas eléctricos inteligentes.

El análisis de concurrencia revela que la producción científica indexada en Web of Science se estructura alrededor de cuatro grandes ejes temáticos:

1. Aprendizaje Automático y Profundo.
2. Estabilidad y Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia,
3. Predicción y optimización energética.
4. Redes Eléctricas Inteligentes y Eficiencia Energética.

Esta organización temática confirma que la inteligencia artificial se ha consolidado como una herramienta transversal en la ingeniería eléctrica, con aplicaciones que abarcan desde el modelado y control de sistemas de potencia hasta la gestión avanzada de redes inteligentes. El mapa de concurrencia proporciona, por tanto, una visión integral del estado del arte y permite identificar las principales tendencias de investigación dentro de la literatura científica proveniente de Web of Science.



4.1.2.2 Análisis de concurrencia de palabras clave mediante VOSviewer (Scopus)

La **Figura. 12** presenta la red de concurrencia de palabras clave obtenida mediante VOSviewer, construida a partir de los registros indexados exclusivamente en la base de datos Scopus. En esta representación, la dimensión de los nodos refleja la relevancia de los términos dentro del conjunto analizado, mientras que la densidad y disposición de las conexiones evidencian la intensidad de las relaciones conceptuales. La segmentación cromática permite distinguir los principales clústeres temáticos que organizan la investigación sobre inteligencia artificial en el ámbito de la ingeniería eléctrica

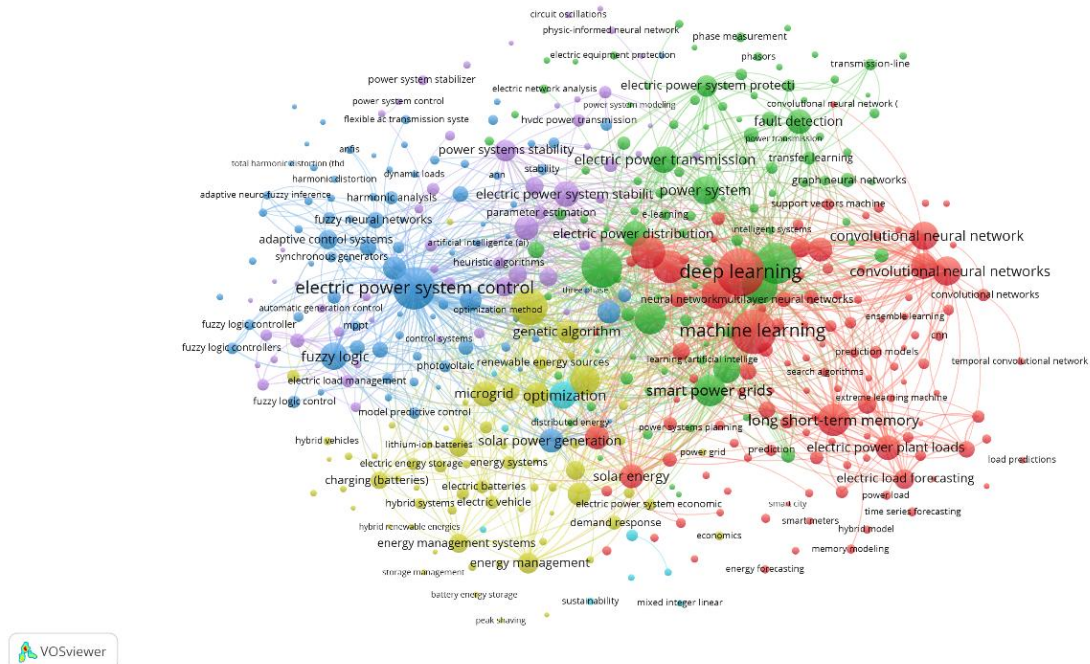


Figura. 12 Análisis de concurrencia en VOSviewer con bases bibliográficas de Scopus

El mapa evidencia una estructura temática densa y altamente interconectada, donde machine learning y deep learning emergen como los nodos centrales del análisis. Estos términos presentan una elevada conectividad con conceptos como artificial neural network, convolutional neural network y long short-term memory, lo que confirma el



predominio de técnicas de aprendizaje automático y profundo en la literatura indexada en Scopus.

La fuerte centralidad de estos nodos indica que dichas metodologías constituyen el núcleo del desarrollo científico reciente en el área.

Un clúster claramente definido se asocia a electric power system control y power system stability, con vínculos hacia términos como power system stabilizer, synchronous generators, adaptive control systems, harmonic distortion y fuzzy neural networks. Este grupo temático refleja una línea de investigación orientada al control, análisis dinámico y estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia, donde las técnicas de inteligencia artificial se integran como herramientas de apoyo a la supervisión y toma de decisiones.

Otro clúster relevante se centra en smart power grids, optimization y genetic algorithm, conectado con aplicaciones como microgrid, energy management systems, electric vehicles y demand response. Este conjunto temático evidencia un enfoque orientado a la optimización operativa y gestión inteligente de la energía, particularmente en contextos de redes eléctricas modernas y sistemas híbridos con fuentes renovables.

Asimismo, se identifica un clúster asociado a solar energy, solar power generation, electric batteries y energy storage systems, lo que indica una fuerte presencia de investigaciones relacionadas con energías renovables y almacenamiento energético, integradas con técnicas de inteligencia artificial para mejorar la eficiencia, la planificación y la operación de los sistemas eléctricos.

En comparación con el mapa obtenido a partir de Web of Science, el análisis basado en Scopus presenta una mayor estructura temática, con un énfasis más marcado en aplicaciones prácticas, como el control de sistemas eléctricos, la gestión energética, la integración de vehículos eléctricos y el uso de redes neuronales convolucionales en problemas de predicción y diagnóstico. Esta característica sugiere que Scopus captura una producción científica más amplia y diversificada en términos de aplicaciones tecnológicas.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



En conjunto, el análisis de concurrencia confirma que, dentro de Scopus, la investigación en inteligencia artificial aplicada a la ingeniería eléctrica se organiza alrededor de múltiples clústeres interrelacionados, dominados por técnicas de aprendizaje automático y profundo, con aplicaciones que abarcan el control y estabilidad de sistemas de potencia, redes eléctricas inteligentes, optimización energética y generación renovable. Este mapa proporciona una visión integral de las tendencias y enfoques predominantes en la literatura científica indexada en Scopus.

4.1.3 Revisión sistemática

- **Tratamiento de datos**

Para garantizar la calidad de la revisión sistemática, se siguió un proceso de depuración y filtrado estructurado:

Consolidación de Base de Datos: Se unificaron los registros obtenidos de Web of Science (WoS) y Scopus, generando un repositorio inicial de 4,863 registros.

Limpieza de Datos: Se aplicaron filtros automatizados para eliminar duplicados y registros con información incompleta (sin título, abstract o palabras clave).

Cribado por Abstract (Fase 1): Se realizó un barrido de los resúmenes aplicando criterios de inclusión de IA aplicada a sistemas eléctricos, periodo 2021-2025 y exclusión de áreas médicas, financieras o sociales, reduciendo la muestra a 659 artículos.

Validación por Texto Completo (Fase 2): Se analizó la relevancia técnica de los documentos restantes, utilizando un sistema de puntuación para identificar aquellos con datos cuantitativos de impacto tecnológico, económico u operativo. La base de datos final se consolidó con 40 artículos de gran impacto.

- **Diagrama prisma actualizado**

En la **Figura. 13** se muestra el proceso de selección y depuración de los artículos científicos considerados en la revisión sistemática, siguiendo la metodología prisma, donde inicialmente se identificaron 4864 registros de ambas bases de datos.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD

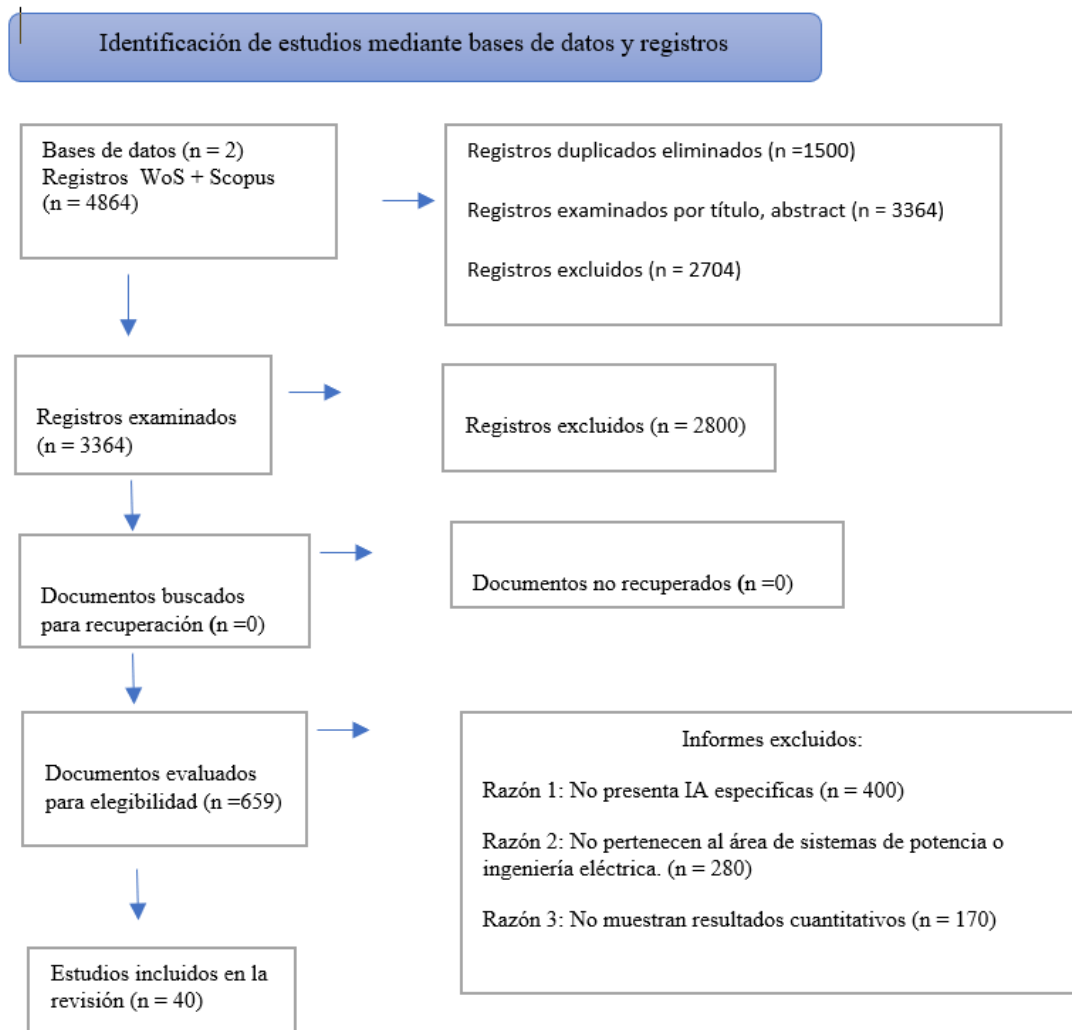


Figura. 13 Diagrama PRISMA del proceso de selección de artículos científicos

Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la investigación, se descartaron los estudios que no abordaban aplicaciones específicas de inteligencia artificial en ingeniería eléctrica, aquellos que no pertenecían al área de sistemas eléctricos de potencia y los que no presentaban resultados cuantitativos. Como resultado de este proceso de filtrado y evaluación de elegibilidad, se seleccionaron 40 estudios finales, los cuales conforman la base de análisis para la síntesis de evidencia presentada en esta investigación.



4.1.4 Matriz de extracción de datos

Para organizar y analizar de manera sistemática la información obtenida de los estudios seleccionados, se elaboró una matriz de extracción de datos. Esta matriz permitió depurar y sintetizar la evidencia relevante proveniente de los artículos incluidos en la revisión, facilitando la identificación de las principales herramientas de inteligencia artificial, sus áreas de aplicación dentro de la ingeniería eléctrica y el tipo de impacto reportado en cada investigación. A partir de este proceso, los estudios fueron agrupados según sus características y contribuciones, dando lugar a dos conjuntos de análisis comparativo. En las siguientes tablas se presenta la Matriz de Síntesis de evidencia del Grupo 1 y la Matriz de Síntesis de evidencia del Grupo 2, donde se resumen los autores, las técnicas de inteligencia artificial empleadas, el campo de aplicación y el impacto tecnológico, económico u operativo identificado en cada caso.

En la **Tabla 2** correspondiente al Grupo 1 presenta un conjunto de estudios en los que se identifican diversas herramientas de inteligencia artificial aplicadas a múltiples áreas de la ingeniería eléctrica. En este grupo se observa una predominancia de técnicas basadas en redes neuronales, algoritmos evolutivos y métodos de aprendizaje por refuerzo, lo que evidencia la tendencia hacia modelos adaptativos y de autoaprendizaje en los sistemas eléctricos modernos.

Tabla 2 Matriz de Síntesis de evidencia Grupo 1

Autor y Año	Herramienta de IA	Área de Aplicación	Impacto Identificado	DOI
Yin, L. (2021)[114]	Emotional Deep Learning	Control de Voltaje	Tecnológico: Sintonización PID automática.	10.1109/ACCESS.2021.3060620
Yurdaer, Kocakulak (2021)[115]	Lógica Difusa (Fuzzy)	Vehículos Eléctricos	Económico: Ahorro energético del 19.11%.	http://dx.doi.org/10.29228/sciperspective.47590
Wang D. et al. (2021)[116]	CNN + Wavelet Transform	Líneas de distribución DC (localización de fallas)	Operativo: Precisión de localización de fallas de hasta 30 m	10.3389/fenrg.2021.804405



CARRERA DE ELECTRICIDAD

Yang N. et al. (2023)[117]	CNN + Fast-DTW + STFT	Redes de distribución (clasificación de fallas)	Tecnológico: Precisión de clasificación del 99.37% y reducción de datos en 40.2%	10.1109/ACCESS.2023.328852
Wang S. (2025)[118]	Graph Neural Networks (GNN) + Multi-task Learning + Deep Learning	Estabilidad de sistemas eléctricos y dinámica de red	Operativo: reducción del error en 48.1% y tiempo de inferencia en 52.1%	10.3390/en18061531
Massaoudi M (2024)[119]	Deep Learning + Federated Transfer Learning + Attention (FLACON)	Estabilidad transitoria del sistema eléctrico	Tecnológico: Precisión de evaluación de estabilidad del 98.98% con preservación de privacidad.	10.1109/OJIA.2024.3426281
Shafei A. et al. (2024)[120]	CNN + Transformada de Park + PFPT	Redes de distribución	Operativo: Precisión del 93.1% en identificación de fallas en condiciones reales	10.1016/j.prime.2024.100820
Dashtdar M. et al. (2023)[121]	Algoritmo Genético + PMU + Estimación de estado (PSSE)	Redes de distribución	Operativo: Error máximo de localización de solo 1.21%	10.3390/machines11010109
Abbas M. et al. (2025)[122]	Red neuronal avanzada (KAN + optimización evolutiva SADE)	Pronóstico de demanda eléctrica (Short-Term Load Forecasting – STLF)	Económico y Tecnológico: Reducción de error hasta 35% (MAPE) y mejora en eficiencia computacional	10.1038/s41598-025-05918-w
Behara R.K. et al. (2023)[123]	Neural Network Predictive Control (NNPC)	Sistemas eólicos con DFIG conectados a red	Tecnológico: Mejora de calidad de potencia y estabilidad ante fallas trifásicas	10.3390/en16134881
Bao D. et al. (2025)[124]	Redes Neuronales (BP Neural Network)	Control de motores eléctricos (PMSM)	Operativo: Reducción del 63% en fluctuaciones de voltaje y mejora del 35% en respuesta dinámica	10.3390/en18082076
Flores-Garrido J. et al. (2025)[125]	LSTM + GRU (Deep Learning)	Calidad de energía / Filtros activos (APF)	Tecnológico: reducción de THD < 5%	10.1109/ACCESS.2025.3564636
Ebrahim O. et al. (2023)[126]	Redes Neuronales Artificiales (ANN)	Control de motores de inducción (eficiencia energética)	Económico: Ahorro energético mediante optimización del flujo en motores de 5.5 kW	10.1049/elp2.12345



CARRERA DE ELECTRICIDAD

Pourmoradi N. (2025)[127]	GCN + Transformer + Transfer Learning + GAN (CTGAN)	Control de estabilidad transitoria (load shedding)	Tecnológico: Mejora en robustez ante fallas no vistas y reducción del tiempo de actualización del modelo.	10.1016/j.rineng.2025.106952
Xiong, Y (2024)[128]	Transformer + Kalman Filter + Autoencoder (modelo híbrido)	Sistemas de almacenamiento energético (BMS)	Tecnológico y Operativo: mayor precisión y estabilidad en SOC	10.3389/fenrg.2024.1424204
Lee et al. (2025)[129]	Bi-GRU (Deep Learning)	Diagnóstico de fallas en sistemas DC	Tecnológico y Operativo: detección rápida y precisa de 95.54%	10.3390/s25030693
Elele et al. (2025)[130]	Tiny Neural Network (Edge AI)	Control de motores eléctricos (PMSM)	Tecnológico: mejora control con bajo consumo	10.3390/wevj16040236
Salman et al. (2024)[131]	TCN + Transformer (modelo híbrido)	Estabilidad de redes eléctricas	Tecnológico y Operativo: mejora precisión en predicción.	10.14445/23488379/IJEE E-V11I12P116
Wang Z et al. (2021)[132]	Graph Convolutional Network (GCN)	Redes de distribución eléctrica	Tecnológico: mejora monitoreo y estimación de estado	10.1109/ACCESS.2021.3054034
Soomro et al. (2022)[133]	Ant Colony Optimization + Control inteligente	Calidad de energía (Voltage Sag)	Operativo: Reducción de THD y mejor compensación de sag bajo fallas	10.3390/su142114661

En cuanto a las áreas de aplicación, se destacan el control de voltaje, la estabilidad del sistema, la predicción de demanda, el control de motores eléctricos, la calidad de energía y la integración de energías renovables, especialmente en sistemas eólicos. Asimismo, se identifican aplicaciones en redes de distribución, almacenamiento energético y diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos. Esto demuestra que la inteligencia artificial se está utilizando tanto en funciones operativas críticas como en procesos de planificación, supervisión y optimización del sistema eléctrico. Esto demuestra que la inteligencia artificial se está utilizando tanto en funciones operativas críticas como en procesos de planificación, supervisión y optimización energética.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Respecto al impacto identificado, se observa una distribución equilibrada entre impactos tecnológicos, económicos y operativos. Los impactos tecnológicos se reflejan en mejoras significativas en la precisión de los modelos, alcanzando valores superiores al 98% en tareas de clasificación, estimación y evaluación de estabilidad, así como en la reducción de distorsión armónica y optimización de algoritmos de control. Los impactos económicos se asocian principalmente al ahorro energético, evidenciado en reducciones de consumo de hasta el 19.11%, así como en la optimización de recursos y mejora de la eficiencia energética en sistemas eléctricos. Por su parte, los impactos operativos están relacionados con la mejora en la estabilidad del sistema, la reducción de errores en localización de fallas (hasta 1.21%), disminución de fluctuaciones de voltaje (hasta 63%) y mejoras en la respuesta dinámica de los sistemas eléctricos. En conjunto, los estudios del Grupo 1 evidencian que la inteligencia artificial contribuye significativamente a la eficiencia, confiabilidad y automatización de los sistemas eléctricos.

La **Tabla 3** correspondiente al Grupo 2 amplía el espectro de aplicaciones de la inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica, incorporando estudios enfocados principalmente en diagnóstico de fallas, estimación de estado, planificación energética, estabilidad del sistema y ciberseguridad en redes eléctricas. Asimismo, se incluyen aplicaciones en redes de distribución con generación fotovoltaica, sistemas híbridos de generación y monitoreo de transformadores. En este grupo se identifican técnicas más diversas, incluyendo redes neuronales profundas, redes informadas por la física, aprendizaje por refuerzo, algoritmos de optimización y modelos híbridos de aprendizaje automático y profundo.

Tabla 3 Matriz de síntesis de evidencia Grupo 2

Autor y Año	Herramienta de IA	Área de Aplicación	Impacto Identificado	DOI
Luo et al. (2024)[134]	Redes Neuronales Convolucionales profundas	Diagnóstico de fallas en rodamientos de turbinas eólicas	Tecnológico y Operativo: mejora la precisión de diagnóstico >99%	10.3390/act13100401



CARRERA DE ELECTRICIDAD

Iliadis et al. (2025)[135]	PINN	Estimación de estado	Tecnológico: Reducción de error hasta 97%	10.3390/app15137507
Sun et al. (2021)[136]	Reinforcement Learning (DDPG)	Redes activas	Operativo: Reducción de fallas en cascada y nodos afectados	10.3390/app11010229
Deng et al. (2023)[137]	GA + Sparrow Search	Planificación	Económico: Reducción de riesgo >50% y aumento de ingresos	10.3390/en16155648
Alsumaidae, Y (2024)[138]	1D-CNN	Switchgear	Tecnológico: Precisión de diagnóstico hasta 100%	10.18280/jesa.570521
Gulraiz et al. (2025)[139]	GNN híbrida (HGNN-DL)	Redes con PV	Tecnológico: Alta precisión ($R^2 = 0.97$, MAE = 0.15)	10.1016/j.rineng.2025.106169
Petrusev et al. (2021)[140]	Reinforcement Learning (TD3PG, PPO)	Control de voltaje en redes de distribución con DER	Operativo: mejora de robustez ante incertidumbre y control en tiempo real (<1s)	10.1016/j.segan.2022.100959
Békési et al. (2024)[141]	Deep Neural Network + TPE (optimización bayesiana)	Estimación de estado en redes de distribución (DSSE)	Tecnológico: reducción de error 14–73% y mejora de tiempo en 4 órdenes de magnitud	10.1016/j.rineng.2024.102908
Fanchiang et al. (2021)[142]	GAN + CNN (Wasserstein Autoencoder + Clasificador)	Diagnóstico de fallas en transformadores mediante imágenes térmicas	Operativo: detección en tiempo real con alta precisión y menor costo de mantenimiento	10.3390/electronics10101161
Ogar et al. (2022)[143]	CatBoost (Machine Learning)	Clasificación de fallas en líneas de transmisión	Tecnológico: precisión de 99.54% y reducción del tiempo de entrenamiento	10.3390/signals3030027
Özdemir, O (2025)[144]	Machine Learning (Ensemble + Redes Neuronales + Regresión)	Detección y localización de fallas en líneas de transmisión	Operativo: 100% detección, 99.97% clasificación y error de localización hasta 26 m	10.3390/pr13020527
Rizvi et al. (2021)[145]	CNN (1D Convolutional Neural Networks)	Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos (STVSA)	Operativo: detección rápida de colapso de voltaje y evaluación en tiempo real	10.1109/ACCESS.2021.3107248
Mai et al. (2022)[146]	Regresión (XGBoost, RF, SVR, Ridge)	Monitoreo de carga de transformadores (redes LV)	Económico: estimación precisa con $R \approx 0.98$ usando solo 5/21 medidores (reducción de infraestructura)	10.1049/stg2.12049



CARRERA DE ELECTRICIDAD

Afrasiabi, S (2022)[147]	Deep Learning (Improved GRU)	Localización de fallas en redes de transmisión	Operativo: alta precisión y robustez ante ruido (gaussiano y no gaussiano)	10.1109/JSYST.2022.3172406
Yang et al. (2022)[148]	GRNN + Algoritmo Genético	Identificación de cargas en sistemas eléctricos aeronáuticos	Tecnológico: precisión de clasificación del 100% en 15 estados de carga	10.3390/aerospace9070350
Bhusal et al. (2021)[149]	Random Forest (regresión) + Regresión Logística (clasificación).	Detección de ciberataques en regulación de voltaje en redes de distribución	Tecnológico–Operativo: detección de ataques coordinados con hasta 99% de precisión	10.1109/ACCESS.2021.3064689
Chhipa et al. (2021)[150]	ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)	Control MPPT en sistemas eólicos (WECS con DFIG)	Tecnológico–Operativo: mejora la extracción de potencia máxima	10.3390/en14196275
Abdalla et al. (2021)[151]	Algoritmo Genético híbrido (MSGGA – Metaheuristic Scanning Genetic Algorithm)	Evaluación de confiabilidad en sistemas de generación híbridos (eólico–solar–almacenamiento)	Tecnológico–Operativo: reducción del tiempo computacional hasta 85% frente a PSO y mejora en la evaluación de confiabilidad	10.1177/0144598720959749
Hou, S (2022)[152]	VMD + CNN + ML híbrido	Identificación de fallas en redes de distribución	Tecnológico: alta precisión y rápida convergencia en clasificación de fallas	10.1049/gtd2.12324
Mossie, M. (2025)[153]	Random Forest + Gradient Boosting + SVM	Evaluación de estabilidad de voltaje en redes de distribución	Tecnológico: precisión $R^2 \approx 0.999$ y RMSE muy bajo (0.0002) en predicción de estabilidad	10.1038/s41598 025-15791-2

Las áreas de aplicación muestran una fuerte orientación hacia la seguridad, confiabilidad y optimización de la operación del sistema eléctrico. Se destacan aplicaciones en diagnóstico y localización de fallas en líneas de transmisión, redes de distribución, transformadores y equipos como switchgear y rodamientos en turbinas eólicas. Asimismo, se identifican aplicaciones en estimación de estado, estabilidad de voltaje, control de redes activas, planificación energética y detección de ciberataques en sistemas de distribución. También se evidencian aplicaciones en sistemas con generación distribuida y monitoreo de carga en transformadores, lo cual demuestra la integración de



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



la inteligencia artificial en funciones de supervisión, protección y control avanzado del sistema eléctrico.

En términos de impacto, el Grupo 2 presenta una mayor concentración de impactos tecnológicos y operativos. Los impactos tecnológicos se evidencian en mejoras significativas en la precisión de los modelos, alcanzando valores superiores al 99% en diagnóstico de fallas y clasificación de eventos, así como en la reducción de errores de estimación hasta en un 97% y mejoras sustanciales en la velocidad de procesamiento. Por su parte, los impactos operativos se reflejan en la detección en tiempo real de fallas, la reducción de eventos en cascada, la mejora de la robustez del sistema ante incertidumbre y la optimización del control en redes eléctricas con tiempos de respuesta inferiores a un segundo. Asimismo, se identifican impactos económicos asociados a la planificación energética, evidenciándose reducciones de riesgo superiores al 50% y optimización de recursos mediante una menor necesidad de infraestructura de medición. En conjunto, estos resultados evidencian que la inteligencia artificial contribuye significativamente a la mejora de la seguridad, confiabilidad y eficiencia operativa del sistema eléctrico.

4.1.5 Herramientas de inteligencia artificial identificadas

A partir del análisis de los estudios incluidos en la revisión sistemática, se identificó una amplia diversidad de herramientas de inteligencia artificial aplicadas a la ingeniería eléctrica. Estas herramientas abarcan tanto técnicas de aprendizaje automático tradicionales como métodos avanzados de aprendizaje profundo y algoritmos metaheurísticos.

El análisis de los estudios incluidos en los Grupos 1 y 2 permitió identificar una amplia variedad de herramientas de inteligencia artificial aplicadas a la ingeniería eléctrica. En total, se observó la presencia de técnicas pertenecientes a diferentes categorías, lo que evidencia la diversidad metodológica en este campo.

Con el fin de presentar de manera estructurada las herramientas de inteligencia artificial identificadas, se construyó la **Tabla 4**, en la cual se detallan las técnicas clasificadas según su tipo y sus aplicaciones específicas en la ingeniería eléctrica



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Tabla 4. Herramientas de inteligencia artificial identificadas y sus principales áreas de aplicación en la ingeniería eléctrica

Categoría	Herramienta de IA	Aplicaciones en ingeniería eléctrica
Aprendizaje automático clásico	Support Vector Machine (SVM)	Diagnóstico de fallas
	Random Forest	Clasificación de señales eléctricas
	Regresión (Ridge, SVR)	Estabilidad del sistema
	XGBoost	Estimación de variables eléctricas
Aprendizaje profundo	Redes neuronales convolucionales (CNN)	Predicción de demanda y generación renovable,
	Long Short-Term Memory (LSTM)	Detección de fallas,
	Bidireccional GRU / LSTM	Estabilidad de sistemas eléctricos, Ciberseguridad en redes eléctricas, Estimación de estado y monitoreo del sistema eléctrico
	Graph Neural Networks	
	Physics-Informed Neural Networks	
	Autoencoders	
	Generative Adversarial Networks (GAN)	
	Transformers	
Algoritmos metaheurísticos y de optimización	Algoritmos Genéticos	Optimización del despacho económico,
	Particle Swarm Optimization (PSO)	Control de sistemas eléctricos,
	Grey Wolf Optimizer	Planificación energética,
	Ant Colony Optimization	Estimación de estado del sistema eléctrico



		Mejora del perfil de tensión
Métodos híbridos y lógica difusa	Lógica difusa	Control energético
	Neuro-fuzzy (ANFIS)	Optimización de sistemas eólicos, Mejora de la eficiencia en sistemas eléctricos

El Grupo 1 presenta una mayor concentración en técnicas de predicción, control y estabilidad, así como en calidad de energía y control de motores. Por su parte, el Grupo 2 amplía el espectro hacia aplicaciones relacionadas con diagnóstico avanzado de fallas, estimación de estado, planificación energética, ciberseguridad en redes eléctricas y sistemas con generación distribuida.

4.1.6 Áreas del sistema eléctrico donde se aplican las herramientas de inteligencia artificial.

El análisis de los estudios incluidos en ambos grupos permitió identificar múltiples áreas del sistema eléctrico donde se aplican herramientas de inteligencia artificial.

1. Operación y estabilidad del sistema eléctrico

Esta es una de las áreas con mayor presencia de aplicaciones en ambos grupos. Se identificaron aplicaciones relacionadas con:

- Control de voltaje.
- Estabilidad transitoria.
- Dinámica del sistema eléctrico.
- Evaluación de estabilidad de voltaje.

Las herramientas utilizadas incluyen redes neuronales, aprendizaje por refuerzo, árboles de decisión y redes informadas por la física.

2. Predicción energética y estimación de variables eléctricas

Otra área con alta representación es la predicción de variables energéticas, tales como:

- Predicción de demanda eléctrica.
- Pronóstico solar y eólico.



- Estimación de estado del sistema eléctrico.
- Monitoreo de carga en transformadores.

Las técnicas más utilizadas en estas aplicaciones fueron LSTM, GRU, CNN, modelos híbridos y algoritmos de regresión.

3. Diagnóstico y detección de fallas en sistemas eléctricos

Se identificaron múltiples aplicaciones en:

- Detección de fallas en transformadores.
- Diagnóstico de motores eléctricos.
- Detección de fallas en líneas de transmisión y distribución.
- Identificación de fallas en equipos como switchgear y turbinas eólicas.

Estas aplicaciones se basan principalmente en modelos de clasificación y aprendizaje automático y aprendizaje profundo.

4. Integración de energías renovables y sistemas eléctricos avanzados

Ambos grupos presentan aplicaciones en:

- Sistemas con generación fotovoltaica (PV).
- Integración de energía eólica y solar.
- Almacenamiento en baterías.

En estas áreas, el aprendizaje profundo y los algoritmos de optimización tienen una presencia relevante.

5. Calidad de energía y control de sistemas eléctricos

Se identificaron aplicaciones en:

- Filtros activos para reducción de distorsión armónica
- Mejora de la calidad de energía.
- Control de motores eléctricos.

Estas aplicaciones utilizan principalmente redes neuronales, modelos híbridos y algoritmos de control inteligente.

6. Ciberseguridad y monitoreo del sistema eléctrico

El Grupo 2 incorpora nuevas áreas como:

- Detección de ciberataques en redes de distribución.



- Monitoreo y supervisión del sistema eléctrico.

Estas aplicaciones utilizan modelos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo para mejorar la seguridad y confiabilidad del sistema.

En conjunto, el análisis de ambos grupos demuestra que la inteligencia artificial se aplica en diversas áreas del sistema eléctrico, desde la operación y control hasta el diagnóstico, la planificación y la seguridad del sistema.

4.2 Impacto tecnológico, económico y operativo de la inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica.

Dentro de la ingeniería eléctrica se identificó diversos tipos de impactos, que derivan de la aplicación de herramientas de inteligencia artificial, el análisis en los grupos 1 y 2 permitieron clasificar estos impactos en tres categorías principales como impacto económico, tecnológico y operativo.

Los resultados evidencian que la inteligencia artificial no solo mejora la precisión de los modelos y algoritmos utilizados en sistemas eléctricos, sino que también contribuye a la optimización de recursos, el ahorro energético y la automatización de procesos. Asimismo, se observa que estos impactos se encuentran interrelacionados, ya que las mejoras tecnológicas se traducen en beneficios económicos y operativos.

4.2.1 Impacto tecnológico

El impacto tecnológico identificado en los estudios analizados se relaciona principalmente con mejoras en la precisión de los modelos, la velocidad de procesamiento, la capacidad de predicción y la resiliencia de los sistemas eléctricos.

Diversos estudios reportan incrementos significativos en la exactitud de los sistemas de diagnóstico y control. Por ejemplo, se evidenció una precisión del 97% en la detección de fallas en líneas de transmisión mediante redes neuronales convolucionales. Estos resultados reflejan la capacidad de los algoritmos de inteligencia artificial para identificar patrones complejos y mejorar la supervisión del sistema eléctrico.

Asimismo, se identificaron avances importantes en la velocidad de procesamiento y análisis, incluyendo reducciones significativas en los tiempos computacionales y mejoras en la eficiencia de los modelos. Además, el uso de redes neuronales informadas por la



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



física permite representar con mayor precisión la dinámica de los sistemas eléctricos, mejorando la estabilidad y confiabilidad del sistema.

En conjunto, estos resultados evidencian que la inteligencia artificial contribuye a:

- Incrementar la precisión de los sistemas eléctricos.
- Mejorar la capacidad de análisis en tiempo real.
- Incrementar la resiliencia y seguridad del sistema.
- Desarrollar modelos híbridos más realistas.

4.2.2 Impacto económico

El impacto económico se refleja principalmente en la reducción de costos operativos, el ahorro energético y la optimización de recursos en los sistemas eléctricos.

Varios estudios reportan mejoras significativas en la eficiencia energética. Por ejemplo, se evidenció un ahorro energético del 19.11% en sistemas eléctricos mediante técnicas de control basadas en lógica difusa. Asimismo, se identifican reducciones en la necesidad de infraestructura de medición mediante modelos de estimación de carga, manteniendo altos niveles de precisión ($R \approx 0.98$).

Estos resultados demuestran que la inteligencia artificial permite optimizar el uso de recursos, reducir costos operativos y mejorar la eficiencia del sistema eléctrico.

optimización de recursos e infraestructura.

- Ahorro energético.
- Reducción de costos operativos.
- Optimización de recursos e infraestructura.

4.2.3 Impacto operativo

El impacto operativo se relaciona con la mejora en el funcionamiento del sistema eléctrico, la automatización de procesos y el incremento de la confiabilidad del suministro.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Los estudios analizados evidencian mejoras significativas en la operación del sistema eléctrico mediante el uso de inteligencia artificial. Entre los principales resultados se destacan:

- Alta precisión en la detección y localización de fallas (hasta 99.97%).
- Reducción del error en localización de fallas (hasta 1.21%).
- Reducción de fluctuaciones de voltaje (hasta 63%).
- Mejora en la respuesta dinámica de sistemas eléctricos (hasta 35%).
- Detección en tiempo real y control en redes eléctricas (<1 segundo).

Estas aplicaciones permiten automatizar procesos que tradicionalmente requerían intervención humana, lo que reduce tiempos de respuesta y minimiza errores operativos.

En términos generales, el impacto operativo se refleja en:

Automatización de procesos.

Mejora de la confiabilidad del sistema.

Reducción de tiempos de respuesta.

Optimización de la operación en tiempo real.

Otro aspecto relevante del impacto operativo es la mejora en la supervisión, control y respuesta del sistema eléctrico mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial, lo que permite una operación más eficiente, precisa y adaptativa ante condiciones variables de operación. Estas herramientas facilitan la detección temprana de fallas, la toma de decisiones en tiempo real y la optimización del comportamiento dinámico del sistema eléctrico.

4.2.5 Síntesis del impacto

El análisis conjunto de los estudios incluidos en los Grupos 1 y 2 evidencia que la inteligencia artificial genera beneficios significativos en la ingeniería eléctrica, impactando de manera simultánea las dimensiones tecnológica, económica y operativa.

En cuanto al impacto tecnológico, este se manifiesta principalmente en la mejora de la precisión de los modelos, el incremento en la velocidad de procesamiento y la capacidad de análisis en tiempo real de los sistemas eléctricos. Asimismo, se observan avances en



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



la identificación de patrones complejos y en la mejora de la estabilidad y seguridad del sistema.

Por su parte, el impacto económico se refleja en la optimización de recursos, la reducción de pérdidas energéticas y la mejora en la eficiencia de operación, lo que contribuye a una disminución de costos en diferentes niveles del sistema eléctrico.

Finalmente, el impacto operativo se evidencia en la automatización de procesos, la mejora de la confiabilidad del sistema, la detección oportuna de fallas y la optimización del comportamiento operativo en tiempo real.

Adicionalmente, el Grupo 2 evidencia una ampliación en las aplicaciones de la inteligencia artificial hacia áreas relacionadas con la ciberseguridad en sistemas eléctricos, la calidad de energía, la coordinación de protecciones y el análisis avanzado de datos, lo que refleja una evolución hacia sistemas eléctricos más inteligentes, seguros y adaptativos.

En conjunto, los resultados confirman que la inteligencia artificial se consolida como una herramienta clave para la modernización de la ingeniería eléctrica, contribuyendo a mejorar la eficiencia, confiabilidad y desempeño de los sistemas eléctricos actuales.

No obstante, se identifican algunas limitaciones en la aplicación de la inteligencia artificial en la ingeniería eléctrica. Entre las principales se encuentran la dependencia de grandes volúmenes de datos para el entrenamiento de los modelos, el alto costo computacional asociado a técnicas avanzadas como el Deep Learning, y la complejidad en la implementación de estos algoritmos en sistemas eléctricos reales. Asimismo, se evidencia una limitada interpretabilidad de ciertos modelos, lo que puede dificultar su adopción en entornos críticos. Estas limitaciones representan desafíos importantes que deben ser abordados en futuras investigaciones.



Conclusiones

- El análisis del estado del arte permitió identificar diversas herramientas de inteligencia artificial aplicadas en la ingeniería eléctrica, entre las que destacan redes neuronales artificiales, modelos de aprendizaje profundo, algoritmos de aprendizaje automático y métodos de optimización inteligente. Asimismo, se evidenció que los modelos basados en redes neuronales profundas, como redes convolucionales y redes recurrentes, presentan una amplia utilización en investigaciones recientes debido a su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos provenientes de sistemas eléctricos y plataformas de monitoreo energético.
- Al analizar los artículos seleccionados se identificó múltiples áreas de aplicación de las herramientas de inteligencia artificial dentro de la ingeniería eléctrica, entre las que resaltan el control y el estabilidad de sistemas eléctricos, la predicción de demanda, la detección de fallas en equipos eléctricos, la gestión de microrredes y la integración de fuentes de energías renovable, lo que evidencia el potencial de la IA para la mejora de operación, supervisión y planificación de los sistemas eléctricos modernos.
- La implementación de herramientas IA genera impactos significativos en los ámbitos tecnológico, económico y operativo de la ingeniería eléctrica. En el aspecto tecnológico, se observa una mejora en la precisión, velocidad de procesamiento y capacidad de análisis de los sistemas eléctricos. En el ámbito económico, se evidencia la optimización de recursos, reducción de pérdidas energéticas y mejora en la eficiencia del sistema. Finalmente, en el aspecto operativo, la inteligencia artificial contribuye a la automatización de procesos, mejora de la confiabilidad del sistema y optimización de la operación en tiempo real.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**CARRERA DE ELECTRICIDAD****Recomendaciones**

- A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, se recomienda que futuras investigaciones profundicen en la aplicación práctica de herramientas de inteligencia artificial dentro de sistemas eléctricos, especialmente en áreas como la predicción de demanda energética, mantenimiento predictivo y la optimización de redes eléctricas, permitiendo validar en entornos operativos los beneficios identificados en la literatura científica.



Referencias bibliográficas.

Según lo estipulado por las Normas IEEE

- [1] B. MacLennan, "History of Artificial Intelligence Before Computers," in *Encyclopedia of Information Science and Technology, Second Edition*, IGI Global, 2009, pp. 1763–1768. doi: 10.4018/978-1-60566-026-4.ch277.
- [2] J. Fan, L. Fang, J. Wu, Y. Guo, and Q. Dai, "From Brain Science to Artificial Intelligence," *Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 248–252, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.eng.2019.11.012.
- [3] F. Badrulhisham, E. Pogatzki-Zahn, D. Segelcke, T. Spisak, and J. Vollert, "Machine learning and artificial intelligence in neuroscience: A primer for researchers," *Brain Behav. Immun.*, vol. 115, pp. 470–479, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.BBI.2023.11.005.
- [4] A. Kumbhar, P. G. Dhawale, S. Kumbhar, U. Patil, and P. Magdum, "A comprehensive review: Machine learning and its application in integrated power system," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 5467–5474, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.08.133.
- [5] K. A. Pupkov, "Intelligent Systems: Development and Issues," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 103, pp. 581–583, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROCS.2017.01.069.
- [6] M. Romero, W. Guédria, H. Panetto, and B. Barafort, "Towards a Characterisation of Smart Systems: A Systematic Literature Review," *Comput. Ind.*, vol. 120, p. 103224, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.COMPIND.2020.103224.
- [7] D. Hassabis, D. Kumaran, C. Summerfield, and M. Botvinick, "Neuroscience-Inspired Artificial Intelligence," *Neuron*, vol. 95, no. 2, pp. 245–258, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.NEURON.2017.06.011.
- [8] L. Carboni *et al.*, "Exploring continual learning strategies in artificial neural networks through graph-based analysis of connectivity: Insights from a brain-inspired perspective," *Neural Networks*, vol. 185, p. 107125, May 2025, doi: 10.1016/J.NEUNET.2025.107125.
- [9] J. Jiang, F. Han, Q. Ling, J. Wang, T. Li, and H. Han, "Efficient network architecture search via multiobjective particle swarm optimization based on decomposition," *Neural Networks*, vol. 123, pp. 305–316, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.NEUNET.2019.12.005.
- [10] Ashish Vaswani and N. P. J. U. L. J. A. N. G. Ł. K. I. P. Noam Shazeer, "Attention is all you need," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, pp. 5998–6008.
- [11] M. V. S. Babu and K. Banana, "A study on narrow artificial intelligence—An overview," *Int. J. Eng. Sci. Adv. Technol.*, vol. 24, pp. 210–219, 2024.
- [12] B. Goertzel, "Artificial General Intelligence: Concept, State of the Art, and Future Prospects," *Journal of Artificial General Intelligence*, vol. 5, no. 1, pp. 1–48, 2014, doi: 10.2478/jagi-2014-0001.



- [13] M. Kumar, A. Professor, G. Kashi University, and T. Sabo, "Issue 4 www.jetir.org(ISSN-2349-5162)," 2024. [Online]. Available: www.jetir.org Garg, A.
- [14] R. W. Blake, R. Mathew, A. George, and N. Papakostas, "Impact of Artificial Intelligence on Engineering: Past, Present and Future," *Procedia CIRP*, vol. 104, pp. 1728–1733, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.PROCIR.2021.11.291.
- [15] M. M. Mijwel, "History of Artificial Intelligence Yapay Zekânın Tarihi History of Artificial Intelligence," 2015.
- [16] R. E. Skinner, *Building the Second Mind: 1956 and the Origins of Artificial Intelligence Computing*. 2012.
- [17] K. Mittal, A. Jain, K. S. Vaisla, O. Castillo, and J. Kacprzyk, "A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 95, p. 103916, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.ENGAPPAL.2020.103916.
- [18] M. Fikri, O. Sabri, and B. Cheddadi, "Calculating voltage magnitudes and voltage phase angles of real electrical networks using artificial intelligence techniques," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 579–5757, Dec. 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i6.pp5749-5757.
- [19] M. A. Sanchez, J. R. Castro, V. Ocegueda-Miramontes, and L. Cervantes, "Hybrid learning for general type-2 TSK fuzzy logic systems," *Algorithms*, vol. 10, no. 3, 2017, doi: 10.3390/A10030099.
- [20] S. A. M. Abdelwahab, I. B. M. Taha, R. Fahim, and S. S. M. Ghoneim, "Transformer fault diagnose intelligent system based on DGA methods," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, 2025, doi: 10.1038/s41598-024-78293-7.
- [21] D. Tian, F. Li, and Y. Wei, "Interval type-2 fuzzy neural networks for multi-label classification," *Knowl. Based. Syst.*, vol. 312, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.knosys.2025.113014.
- [22] I. E. Abasi-Obot, A. B. Kunya, G. S. Shehu, and Y. Jibril, "High Impedance Fault Detection and Localization Using Fully-Connected Convolutional Neural Network: A Deep Learning Approach," *Nigerian Journal of Technological Development*, vol. 20, no. 4, pp. 62–71, Dec. 2023, doi: 10.4314/njtd.v18i4.2143.
- [23] F. Sami, "Optimize electric automation control using artificial intelligence (AI)," *Optik (Stuttg.)*, vol. 271, p. 170085, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.IJLEO.2022.170085.
- [24] A. Kumbhar, P. G. Dhawale, S. Kumbhar, U. Patil, and P. Magdum, "A comprehensive review: Machine learning and its application in integrated power system," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 5467–5474, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.08.133.
- [25] Q. Ren, W. Kang, X. Yang, Q. Wang, and Q. Huang, "Multi-dimensional deep learning-based anomaly detection and adaptive security strategy for sustainable power grid operation," *Measurement*, vol. 252, p. 117313, Aug. 2025, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2025.117313.



- [26] T. Meridji, G. Joós, and J. Restrepo, “A power system stability assessment framework using machine-learning,” *Electric Power Systems Research*, vol. 216, p. 108981, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.EPSR.2022.108981.
- [27] L. B. Yang, “Application of Artificial Intelligence in Electrical Automation Control,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 166, pp. 292–295, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROCS.2020.02.097.
- [28] R. Ricardo and S. Reyes, “UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES INSTITUTO DE POSTGRADO TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.”
- [29] R. E. Barrera Parra, C. Méndez Martínez, and J. C. Cobos Torres, “Uso de Inteligencia artificial y Drones para el diseño de redes eléctricas.,” *MQRInvestigar*, vol. 7, no. 1, pp. 155–187, Jan. 2023, doi: 10.56048/mqr20225.7.1.2023.155-187.
- [30] B. Oviedo-Bayas, C. Zambrano-Vega, E. Amable Samaniego-Mena, and Á. Torres-Quijije, “INTELIGENCIA ARTIFICIAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND SUSTAINABILITY: INNOVATION FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND ENERGY EFFICIENCY Cita sugerida (APA, séptima edición)”.
- [31] H. O. Buitrón-Barros, “Integración de inteligencia artificial en redes eléctricas inteligentes y su potencial transformador,” *Horizon Nexus Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 29–42, Apr. 2024, doi: 10.70881/hnj/v2/n2/37.
- [32] Y. N. Doddamani and U. C. Kapale, “A transition from manual to intelligent automated power system operation - A indicative review,” Aug. 01, 2019, *Institute of Advanced Engineering and Science*. doi: 10.11591/ijece.v9i4.pp2274-2280.
- [33] Dr. Abhijit Chandratreya, “AI-Powered Innovations in Electrical Engineering: Enhancing Efficiency, Reliability, and Sustainability,” 2024. [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0001-9403-2094>
- [34] M. H. Momade, S. Durdyev, D. Estrella, and S. Ismail, “Systematic review of application of artificial intelligence tools in architectural, engineering and construction,” *Frontiers in Engineering and Built Environment*, vol. 1, no. 2, pp. 203–216, Jan. 2021, doi: 10.1108/FEBE-07-2021-0036.
- [35] I. Alhamrouni *et al.*, “A Comprehensive Review on the Role of Artificial Intelligence in Power System Stability, Control, and Protection: Insights and Future Directions,” Jul. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/app14146214.
- [36] O. Bellido-Valdiviezo *et al.*, “Artificial intelligence: A review of the scientific literature in Scopus,” *Original Research*, vol. 11, no. 4, pp. 53–68, 2023.
- [37] C. Técnicas Aplicadas Artículo de Revisión, V. I. Samuel Solis-Mora, and D. I. Fernando Gruezo-Valencia, “La Inteligencia Artificial (IA) al servicio de la eficiencia energética en el Ecuador La Inteligencia Artificial (IA) al servicio de la eficiencia energética en el Ecuador Artificial Intelligence (AI) at the service of energy efficiency in



Ecuador

- Inteligência Artificial (IA) a serviço da eficiência energética no Ecuador,” vol. 8, no. 2, pp. 600–621, 2022, doi: 10.23857/dc.v8i2.2665.
- [38] R. Ricardo and S. Reyes, “UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES INSTITUTO DE POSTGRADO TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.”
- [39] A. Bin Rashid and M. A. K. Kausik, “AI revolutionizing industries worldwide: A comprehensive overview of its diverse applications,” Dec. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.hybadv.2024.100277.
- [40] G. Porawagamage, K. Dharmapala, J. S. Chaves, D. Villegas, and A. Rajapakse, “A review of machine learning applications in power system protection and emergency control: opportunities, challenges, and future directions,” *Frontiers in Smart Grids*, vol. Volume 3-2024, 2024, [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/smart-grids/articles/10.3389/frsgr.2024.1371153>
- [41] R. Islam, M. A. H. Rivin, S. Sultana, M. A. B. Asif, M. Mohammad, and M. Rahaman, “Machine learning for power system stability and control,” Jun. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2025.105355.
- [42] S. Aslam, P. P. Aung, A. S. Rafsanjani, and A. P. P. A. Majeed, “Machine learning applications in energy systems: current trends, challenges, and research directions,” Dec. 01, 2025, *Springer Nature*. doi: 10.1186/s42162-025-00524-6.
- [43] A. T. D. Perera and P. Kamalaruban, “Applications of reinforcement learning in energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, p. 110618, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110618.
- [44] J. Paredes, D. Chávez, R. Isa-Jara, and D. Vargas, “A hybrid machine learning algorithm approach to predictive maintenance tasks: A comparison with machine learning algorithms,” *Results in Engineering*, vol. 26, p. 105137, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.RINENG.2025.105137.
- [45] K. Zhang, Y. Shen, Y. Wang, and J. J. Zhang, “Research on Active Power Corrective Control of the Power System Based on Deep Reinforcement Learning Model,” in *Proceedings - 2024 IEEE 4th International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence, DTPI 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 200–205. doi: 10.1109/DTPI61353.2024.10778799.
- [46] M. H. Ortí, D. Toro, and P. A. Guinot Martínez, “Autores.”
- [47] “Introduccion_a_las_Redes_Neuronales_Arti”.
- [48] M. T. Hagh and A. M. Kashtiban, “Application of Neural Networks in Power Systems; A Review.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/277298374>
- [49] H. Salehinejad, S. Sankar, J. Barfett, E. Colak, and S. Valaee, “Recent Advances in Recurrent Neural Networks,” Feb. 2018, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1801.01078>



CARRERA DE ELECTRICIDAD

- [50] I. Mienye, T. G. Swart, and G. Obaido, "Recurrent Neural Networks: A Comprehensive Review of Architectures, Variants, and Applications," Sep. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/info15090517. D.
- [51] X. B. Olabe, "REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y SUS APLICACIONES."
- [52] V. S. S. Vankayala and N. D. Rao, "Artificial neural networks and their applications to power systems—a bibliographical survey," *Electric Power Systems Research*, vol. 28, no. 1, pp. 67–79, Oct. 1993, doi: 10.1016/0378-7796(93)90081-O.
- [53] C.-C. Ku and K. Y. Lee, "Diagonal Recurrent Neural Networks for Dynamic Systems Control," 1995.
- [54] O. I. Abiodun, A. Jantan, A. E. Omolara, K. V. Dada, N. A. E. Mohamed, and H. Arshad, "State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey," *Heliyon*, vol. 4, no. 11, p. e00938, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.HELIYON.2018.E00938.
- [55] M. Khodayar and J. Regan, "Deep Neural Networks in Power Systems: A Review," Jun. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16124773.
- [56] S. Mahjoub, L. Chrifi-Alaoui, B. Marhic, and L. Delahoche, "Predicting Energy Consumption Using LSTM, Multi-Layer GRU and Drop-GRU Neural Networks," *Sensors*, vol. 22, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/s22114062.
- [57] S. Khan *et al.*, "Optimizing load demand forecasting in educational buildings using quantum-inspired particle swarm optimization (QPSO) with recurrent neural networks (RNNs): a seasonal approach," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-04301-z.
- [58] L. Shao, Q. Guo, C. Li, J. Li, and H. Yan, "Short-Term Load Forecasting Based on EEMD-WOA-LSTM Combination Model," *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/2166082.
- [59] S. M. Hasanat, M. Haris, K. Ullah, S. Z. Shah, U. Abid, and Z. Ullah, "Hybrid CNN–LSTM Model With Soft Attention Mechanism for Short-Term Load Forecasting in Smart Grid," *Engineering Reports*, vol. 7, no. 5, May 2025, doi: 10.1002/eng2.70163.
- [60] M. Abumohsen, A. Y. Owda, and M. Owda, "Electrical Load Forecasting Using LSTM, GRU, and RNN Algorithms," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 5, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16052283.
- [61] G. Wang, Z. Zhang, Z. Bian, and Z. Xu, "A short-term voltage stability online prediction method based on graph convolutional networks and long short-term memory networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 127, p. 106647, May 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2020.106647.
- [62] Q. Chen and H. Wang, "Time-adaptive transient stability assessment based on gated recurrent unit," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 133, p. 107156, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.107156.



- [63] H. Lu, R. Shi, X. Fan, and Z. Deng, “A novel fault diagnosis method for key transmission sections based on Nadam-optimized GRU neural network,” *Electric Power Systems Research*, vol. 233, p. 110522, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.EPSR.2024.110522. Hu, H.
- [64] S. Cheng, Q. Xu, H. Wang, Z. Yu, R. Wang, and T. Ran, “A transient stability assessment method for power systems incorporating residual networks and BiGRU-attention,” *Global Energy Interconnection*, vol. 8, no. 1, pp. 143–159, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.GLOEI.2024.09.001.
- [65] L. Huang, K. Dong, J. Zhao, K. Liu, C. Jin, and X. Guo, “A multi-task transient stability assessment method adapted to topology changes using multi-graph sample and aggregate-attention network,” *Front. Energy Res.*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1321998.
- [66] T. Liu, Z. Tang, Y. Huang, L. Xu, and Y. Yang, “Online prediction and control of post-fault transient stability based on PMU measurements and multi-task learning,” *Front. Energy Res.*, vol. 10, Jan. 2023, doi: 10.3389/fenrg.2022.1084295.
- [67] E. Arslan Tuncar, Ş. Sağlam, and B. Oral, “A review of short-term wind power generation forecasting methods in recent technological trends,” *Energy Reports*, vol. 12, pp. 197–209, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.EGYR.2024.06.006.
- [68] W. Jin and P. Wang, “A LSTM-driven stochastic optimization framework for virtual power plant demand response: integration of multi-tier interruptible and shiftable industrial loads,” *Energy Conversion and Management: X*, p. 101144, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.ECMX.2025.101144.
- [69] F. Jafari, J. Moerschell, and K. Riesen, “Predicting Photovoltaic Power Output Using LSTM: A Comparative Study Using both Historical and Climate Data,” in *International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*, Science and Technology Publications, Lda, 2025, pp. 733–740. doi: 10.5220/0013258000003905.
- [70] Y. Wang *et al.*, “An electricity load forecasting model based on multilayer dilated LSTM network and attention mechanism,” *Front. Energy Res.*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1116465.
- [71] M. A. Albadr, S. Tiun, M. Ayob, and F. Al-Dhief, “Genetic algorithm based on natural selection theory for optimization problems,” *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 11, pp. 1–31, Nov. 2020, doi: 10.3390/sym12111758.
- [72] R. Torkan, A. Ilinca, and M. Ghorbanzadeh, “A genetic algorithm optimization approach for smart energy management of microgrid,” *Renew. Energy*, vol. 197, pp. 852–863, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.07.055.
- [73] C. D. Zuluaga-Ríos, “A modified and extended genetic algorithm for optimal distributed generation grid-integration solutions in direct current power grids,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 10, p. 100857, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.PRIME.2024.100857.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

- [74] T. Felling, "Development of a genetic algorithm and its application to a bi-level problem of system cost optimal electricity price zone configurations," *Energy Econ.*, vol. 101, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.eneco.2021.105422.
- [75] V. A. Jimenez and A. Will, "A new data-driven method based on Niching Genetic Algorithms for phase and substation identification," *Electric Power Systems Research*, vol. 199, p. 107434, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.EPSR.2021.107434.
- [76] J. H. Yi, R. Cherkaoui, M. Paolone, D. Shchetinin, and K. Knezovic, "Expansion planning of active distribution networks achieving their dispatchability via energy storage systems," *Appl. Energy*, vol. 326, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119942.
- [77] Chidanandappa R., T. Ananthapadmanabha, and R. H.C., "Genetic Algorithm Based Network Reconfiguration in Distribution Systems with Multiple DGs for Time Varying Loads," *Procedia Technology*, vol. 21, pp. 460–467, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.PROTCY.2015.10.023.
- [78] A. Ganjehkaviri, M. N. Mohd Jaafar, S. E. Hosseini, and H. Barzegaravval, "Genetic algorithm for optimization of energy systems: Solution uniqueness, accuracy, Pareto convergence and dimension reduction," *Energy*, vol. 119, pp. 167–177, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.034.
- [79] N. Debdouche, L. Zarour, A. Chebabhi, N. Bessous, H. Benbouhenni, and I. Colak, "Genetic algorithm-super-twisting technique for grid-connected PV system associate with filter," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 4231–4252, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.EGYR.2023.10.074.
- [80] A. S. C. Martins, L. R. de Araujo, and D. R. R. Penido, "Sensibility Analysis with Genetic Algorithm to Allocate Distributed Generation and Capacitor Banks in Unbalanced Distribution Systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 209, p. 107962, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.EPSR.2022.107962.
- [81] D. Andrade-Benavides, D. Vallejo-Huanga, and P. Morillo, "Fuzzy Logic Model for Failure Analysis in Electric Power Distribution Systems," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 204, pp. 497–504, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.PROCS.2022.08.061.
- [82] K. Dahmane *et al.*, "Fuzzy Logic Based Adaptive P&O MPPT Control of a DC-DC Boost Converter Used in a Wind Energy Conversion System with a Permanent Magnet Synchronous Generator," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 58, no. 13, pp. 587–592, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.IFACOL.2024.07.546.
- [83] J. Grosset, A.-J. Fougères, J.-M. Bonnin, M. Moïse, and D.- Kouam, "Fuzzy Agent-Based Simulations of Cooperative Strategies for Task Allocation, Collision Avoidance, and Battery Charging Management of Autonomous Industrial Vehicles Djoko-Kouam Moïse ECAM Rennes Fuzzy Agent-Based Simulations of Cooperative Strategies for Task Allocation, Collision Avoidance, and Battery Charging Management of Autonomous Industrial Vehicles." [Online]. Available: http://www.iariajournals.org/systems_and_measurements/2025,



- [84] J. Makacha, E. T. Mharakurwa, and L. O. Mogaka, “An integrated fuzzy logic approach for valuation of power transformer’s degree of healthiness or faultiness,” *Heliyon*, vol. 11, no. 4, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42789.
- [85] C. Ma, W. Dong, Y. Shi, F. Zhang, and Q. Yang, “A fuzzy logic dispatching method based on model predictive control for adaptively addressing uncertain operation scenarios in multi-energy systems,” *Energy*, vol. 322, p. 135724, May 2025, doi: 10.1016/J.ENERGY.2025.135724.
- [86] O. Ibrahim *et al.*, “Development of fuzzy logic-based demand-side energy management system for hybrid energy sources,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 18, p. 100354, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.ECMX.2023.100354.
- [87] M. A. Abdel Ghany, M. A. Mosa, A. M. Abdel Ghany, and M. Y. Yousef, “Improving the frequency response of a multi-generation power system using adaptive variable structure fuzzy controller,” *Electric Power Systems Research*, vol. 232, p. 110368, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.EPSR.2024.110368.
- [88] A. Beheshtikhoo, M. Pourgholi, and I. Khazae, “Design of type-2 fuzzy logic controller in a smart home energy management system with a combination of renewable energy and an electric vehicle,” *Journal of Building Engineering*, vol. 68, p. 106097, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JOBE.2023.106097.
- [89] H. Ouifak and A. Idri, “A comprehensive review of fuzzy logic based interpretability and explainability of machine learning techniques across domains,” *Neurocomputing*, vol. 647, p. 130602, Sep. 2025, doi: 10.1016/J.NEUCOM.2025.130602.
- [90] F. P. Nishanth, S. K. Dash, and S. R. Mahapatro, “Critical study of type-2 fuzzy logic control from theory to applications: A state-of-the-art comprehensive survey,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 10, p. 100771, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.PRIME.2024.100771.
- [91] D. H. Yoon and J. Yoon, “Development of a real-time fault detection method for electric power system via transformer-based deep learning model,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 159, p. 110069, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.IJEPES.2024.110069.
- [92] “Redes_Neuronales_y_Sistemas_Difusos”.
- [93] A. Hamza, Z. Ali, S. Dudley, K. Saleem, M. Uneeb, and N. Christofides, “A multi-stage review framework for AI-driven predictive maintenance and fault diagnosis in photovoltaic systems,” *Appl. Energy*, vol. 393, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.126108.
- [94] F. Fdez-Riverola and J. M. Corchado, “Sistemas Híbridos Neuro-Simbólicos: una revisión.”
- [95] S. Wang, Q. Tan, X. Ding, and J. Li, “Efficient microgrid energy management with neural-fuzzy optimization,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 64, pp. 269–281, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.03.291.



- [96] H. Karimi, M. T. H. Beheshti, A. Ramezani, and H. Zareipour, "Intelligent control of islanded AC microgrids based on adaptive neuro-fuzzy inference system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 133, p. 107161, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.107161.
- [97] A. Izadi, M. Shahafve, and P. Ahmadi, "Neural network genetic algorithm optimization of a transient hybrid renewable energy system with solar/wind and hydrogen storage system for zero energy buildings at various climate conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 260, p. 115593, May 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.115593.
- [98] S. Baghya Shree and N. Kamaraj, "Hybrid Neuro Fuzzy approach for automatic generation control in restructured power system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 74, pp. 274–285, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.05.029.
- [99] P. MARTIN. DUNCAN, *SEA-SHORE (CLASSIC REPRINT)*. FORGOTTEN BOOKS, 2018.
- [100] R. Ricardo and S. Reyes, "UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES INSTITUTO DE POSTGRADO TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN."
- [101] S. Biswal and M. Biswal, "Detection of current transformer saturation phenomenon for secured operation of smart power network," *Electric Power Systems Research*, vol. 175, p. 105926, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.EPSR.2019.105926.
- [102] M. Aria and C. Cuccurullo, "bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis," *J. Informetr.*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.JOI.2017.08.007.
- [103] N. J. van Eck and L. Waltman, "Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping," *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523–538, 2010, doi: 10.1007/s11192-009-0146-3.
- [104] J. J. Yepes-Nuñez, G. Urrútia, M. Romero-García, and S. Alonso-Fernández, "Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas," *Rev. Esp. Cardiol.*, vol. 74, no. 9, pp. 790–799, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.RECESP.2021.06.016.
- [105] L. Yin, C. Zhang, Y. Wang, F. Gao, J. Yu, and L. Cheng, "Emotional deep learning programming controller for automatic voltage control of power systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 31880–31891, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060620.
- [106] E. Yurdaer and T. Kocakulak, "Comparison of Energy Consumption of Different Electric Vehicle Power Systems Using Fuzzy Logic-Based Regenerative Braking," *Engineering Perspective*, vol. 1, no. 1, pp. 11–21, 2021, doi: 10.29228/sciperspective.47590.



CARRERA DE ELECTRICIDAD

- [107] D. Wang, B. Wang, W. Zhang, C. Zhang, and J. Yu, "Fault Location with High Precision of Flexible DC Distribution System Using Wavelet Transform and Convolution Neural Network," *Front. Energy Res.*, vol. 9, Dec. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.804405.
- [108] N. C. Yang and J. M. Yang, "Fault Classification in Distribution Systems Using Deep Learning With Data Preprocessing Methods Based on Fast Dynamic Time Warping and Short-Time Fourier Transform," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 63612–63622, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3288852.
- [109] S. Wang *et al.*, "A Multi-Task Spatiotemporal Graph Neural Network for Transient Stability and State Prediction in Power Systems," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 6, Mar. 2025, doi: 10.3390/en18061531.
- [110] M. Massaoudi, H. Abu-Rub, and A. Ghrayeb, "FLACON: A Deep Federated Transfer Learning-Enabled Transient Stability Assessment During Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults," *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 5, pp. 253–266, 2024, doi: 10.1109/OJIA.2024.3426281.
- [111] A. P. Shafei, J. F. A. Silva, and J. Monteiro, "Convolutional neural network approach for fault detection and characterization in medium voltage distribution networks," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 10, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100820.
- [112] M. Dashtdar *et al.*, "Fault Location in Distribution Network by Solving the Optimization Problem Based on Power System Status Estimation Using the PMU," *Machines*, vol. 11, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/machines11010109.
- [113] M. Abbas *et al.*, "Self-adaptive evolutionary neural networks for high-precision short-term electric load forecasting," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-05918-w.
- [114] R. K. Behara and A. K. Saha, "Neural Network Predictive Control for Improved Reliability of Grid-Tied DFIG-Based Wind Energy System under the Three-Phase Fault Condition," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/en16134881.
- [115] D. Bao *et al.*, "Research on the High Stability of an Adaptive Controller Based on a Neural Network for an Electrolysis-Free-Capacitor Motor Drive System," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 8, Apr. 2025, doi: 10.3390/en18082076.
- [116] "Deep_Learning-Based_Control_of_Active_Power_Filter".
- [117] O. S. Ebrahim, M. A. Badr, A. S. Elgendy, P. K. Jain, and K. O. Shawky, "Neural network based robust optimal energy control of pulse width modulation-inverter fed motor driving pump," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 17, no. 10, pp. 1334–1346, Oct. 2023, doi: 10.1049/elp2.12345.
- [118] N. Pourmoradi, M. T. Ameli, and S. Azad, "A multitask active transfer learning-based load shedding using a hybrid graph convolutional network–transformer model for transient stability control in power systems with missing data and unseen faults," *Results in Engineering*, vol. 27, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.106952.



- [119] Y. Xiong, Q. Shi, L. Shen, C. Chen, W. Lu, and C. Xu, “A hybrid neural network based on KF-SA-Transformer for SOC prediction of lithium-ion battery energy storage systems,” *Front. Energy Res.*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1424204.
- [120] B. Lee, Y. Kim, H. Lee, and C. Kang, “Bidirectional Gated Recurrent Unit Neural Network for Fault Diagnosis and Rapid Maintenance in Medium-Voltage Direct Current Systems,” *Sensors*, vol. 25, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.3390/s25030693.
- [121] M. J. M. Elele, D. Pau, S. Zhuang, and T. Facchinetti, “Compensating PI Controller’s Transients with Tiny Neural Network for Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motors,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 4, Apr. 2025, doi: 10.3390/wevj16040236.
- [122] D. Salman, A. F. Ali, S. A. Ali, and A. S. Mohamed, “Enhancing Power Grid Stability through Reactive Power Demand Forecasting Using Deep Learning,” *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 11, no. 12, pp. 170–185, Dec. 2024, doi: 10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P116.
- [123] Z. Wang, Y. Chen, S. Huang, X. Zhang, and X. Liu, “Temporal Graph Super Resolution on Power Distribution Network Measurements,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 70628–70638, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3054034.
- [124] A. H. Soomro, A. S. Larik, M. A. Mahar, and A. A. Sahito, “Simulation-Based Comparison of PID with Sliding Mode Controller for Matrix-Converter-Based Dynamic Voltage Restorer under Variation of System Parameters to Alleviate the Voltage Sag in Distribution System,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 21, Nov. 2022, doi: 10.3390/su142114661.
- [125] Y. Luo, Y. Yang, S. Kang, X. Tian, S. Liu, and F. Sun, “Wind Turbine Bearing Failure Diagnosis Using Multi-Scale Feature Extraction and Residual Neural Networks with Block Attention,” *Actuators*, vol. 13, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.3390/act13100401.
- [126] P. Iliadis, S. Petridis, A. Skembris, D. Rakopoulos, and E. Kosmatopoulos, “Physics-Informed Neural Networks for Enhanced State Estimation in Unbalanced Distribution Power Systems,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 13, Jul. 2025, doi: 10.3390/app15137507.
- [127] P. Sun, Y. Dong, S. Yuan, and C. Wang, “Preventive control policy construction in active distribution network of cyber-physical system with reinforcement learning,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–20, Jan. 2020, doi: 10.3390/app11010229.
- [128] J. Deng, L. Lin, Y. Zhang, and Y. Ma, “A Collaborative Planning Method for the Source and Grid in a Distribution System That Considers Risk Measurement,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 15, Aug. 2023, doi: 10.3390/en16155648.
- [129] Y. A. M. Alsumaidae, M. M. Yahya, and A. H. Yaseen, “Reliable Mechanical Fault Diagnosis in Medium Voltage Electrical Switchgear Using a 1D-Convolutional Neural



- Network,” *Journal European des Systemes Automatises*, vol. 57, no. 5, pp. 1461–1470, Oct. 2024, doi: 10.18280/jesa.570521.
- [130] A. Gulraiz, S. S. H. Zaidi, H. Gulraiz, B. M. Khan, M. Ali, and B. Khan, “Leveraging dense layer hybrid graph neural networks for managing overvoltage in PV-dominated distribution systems,” *Results in Engineering*, vol. 27, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.106169.
- [131] A. Petrushev, M. A. Putratama, R. Rigo-Mariani, V. Debusschere, P. Reignier, and N. Hadjsaid, “Reinforcement Learning for Robust Voltage Control in Distribution Grid under Uncertainties.”
- [132] G. Békési, L. Barancsik, and B. Hartmann, “Deep neural network based distribution system state estimation using hyperparameter optimization,” *Results in Engineering*, vol. 24, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102908.
- [133] K. H. Fanchiang, Y. C. Huang, and C. C. Kuo, “Power electric transformer fault diagnosis based on infrared thermal images using wasserstein generative adversarial networks and deep learning classifier,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 10, no. 10, May 2021, doi: 10.3390/electronics10101161.
- [134] V. N. Ogar, S. Hussain, and K. A. A. Gamage, “Transmission Line Fault Classification of Multi-Dataset Using CatBoost Classifier,” *Signals*, vol. 3, no. 3, pp. 468–482, Sep. 2022, doi: 10.3390/signals3030027.
- [135] Ö. Özdemir, R. Köker, and N. Pamuk, “Fault Classification and Precise Fault Location Detection in 400 kV High-Voltage Power Transmission Lines Using Machine Learning Algorithms,” *Processes*, vol. 13, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.3390/pr13020527.
- [136] S. M. H. Rizvi, S. K. Sadanandan, and A. K. Srivastava, “Data-Driven Short-Term Voltage Stability Assessment Using Convolutional Neural Networks Considering Data Anomalies and Localization,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 128345–128358, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3107248.
- [137] T. T. Mai, P. H. Nguyen, N. A. N. M. M. Haque, and G. A. J. M. Pemen, “Exploring regression models to enable monitoring capability of local energy communities for self-management in low-voltage distribution networks,” *IET Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 25–41, Feb. 2022, doi: 10.1049/stg2.12049.
- [138] S. Afrasiabi, M. Afrasiabi, M. A. Jarrahi, and M. Mohammadi, “Fault Location and Faulty Line Selection in Transmission Networks: Application of Improved Gated Recurrent Unit,” *IEEE Syst. J.*, vol. 16, no. 3, pp. 5056–5066, Sep. 2022, doi: 10.1109/JSYST.2022.3172406.
- [139] J. Yang, X. Bao, and Z. Yang, “Load Identification for the More Electric Aircraft Distribution System Based on Intelligent Algorithm,” *Aerospace*, vol. 9, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/aerospace9070350.



- [140] N. Bhusal, M. Gautam, and M. Benidris, “Detection of Cyber Attacks on Voltage Regulation in Distribution Systems Using Machine Learning,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 40402–40416, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3064689.
- [141] A. A. Chhipa *et al.*, “Adaptive neuro-fuzzy inference system-based maximum power tracking controller for variable speed wecs,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14196275.
- [142] A. N. Abdalla *et al.*, “Metaheuristic searching genetic algorithm based reliability assessment of hybrid power generation system,” *Energy Exploration and Exploitation*, vol. 39, no. 1, pp. 488–501, Jan. 2021, doi: 10.1177/0144598720959749.
- [143] S. Hou and W. Guo, “Fault identification method for distribution network based on parameter optimized variational mode decomposition and convolutional neural network,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 16, no. 4, pp. 737–749, Feb. 2022, doi: 10.1049/gtd2.12324.
- [144] M. A. Mossie, T. T. Yetayew, G. T. Bitew, M. G. Yenealem, and T. M. Beza, “Machine learning algorithms for voltage stability assessment in electrical distribution systems,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-15791-2.